

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ESTUDIO DE LA DEFECTOLOGÍA EN  
RUEDAS FERROVIARIAS**

Autor del proyecto: Arturo Herreros Garrido  
Director del proyecto: Julio Álvarez Rodríguez

Abril 2010





<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación.....	3
1.3. Objetivos.....	4
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>7</b>
2.1. Introducción a la Mecánica de la Fractura y Fatiga.....	7
2.1.1. Defectos y concentración de tensiones.....	9
2.1.2. Mecanismos de Fractura.....	12
2.1.2.1. Fractura Frágil: Clivaje.....	12
2.1.2.2. Fractura Dúctil: Coalescencia de Microcavidades.....	12
2.1.3. Mecánica de la Fractura.....	13
2.1.3.1. Criterios de diseño.....	13
2.1.3.2. Criterio de Fractura.....	14
2.1.3.3. Modos de Fractura.....	15
2.1.4. Fenómeno de Fatiga.....	16
2.1.4.1. Nucleación de fisuras.....	16
2.1.4.2. Propagación de fisuras.....	17
2.1.4.3. Alto número de ciclos Vs Bajo número de ciclos.....	18
2.1.5. Curvas S-N.....	19
2.1.5.1. Definiciones.....	19
2.1.5.2. Factores que modifican las curvas S-N.....	22
2.1.5.3. Teorías correctoras: Goodman, Soderberg, Gerber.....	23
2.2. Introducción a la Dinámica Ferroviaria.....	25
2.2.1. Modelos de contacto rueda-carril.....	25
2.2.2. Concepto de pseudo-deslizamiento.....	28
2.2.3. Problema normal. Teoría de Hertz.....	29
2.2.4. Problema tangencial.....	32
2.2.4.1. Teoría de Jonson & Vermeulen.....	32
2.2.4.2. Teoría lineal de Kalker.....	33
2.2.4.3. Teoría simplificada de Kalker.....	35
2.3. Modelos para predecir el fallo por fatiga en ruedas de vehículos ferroviarios.....	36
2.3.1. Modelos para predecir el RCF.....	36
2.3.2. Fatiga superficial.....	37
2.3.2.1. Mecanismos de fatiga.....	37
2.3.2.2. Modelo predictivo.....	38
2.3.2.3. Índice de fatiga superficial.....	40



2.3.3. Fatiga subsuperficial.....	41
2.3.3.1. Mecanismos de fatiga.....	41
2.3.3.2. Modelo predictivo.....	41
2.3.3.3. Índice de fatiga subsuperficial.....	46
2.3.4. Fatiga debida a defectos profundos.....	48
2.3.4.1. Mecanismos de fatiga.....	48
2.3.4.2. Modelo predictivo e índice de fatiga.....	49

## **CAPÍTULO 3. MATERIAL RODANTE EN VEHÍCULOS FERROVIARIOS...51**

3.1. Introducción.....	51
3.2. Material rodante en vehículos ferroviarios.....	52
3.2.1. Funciones principales del órgano de rodadura y terminología.....	52
3.2.2. Componentes del bogie.....	53
3.2.2.1. Ejes montados.....	53
3.2.2.2. Caja de grasa.....	59
3.2.2.3. Ruedas ferroviarias.....	62
3.2.2.3.1. Partes de la rueda ferroviaria.....	64
3.3. Fabricación de ruedas.....	65
3.3.1. Forja en blanco.....	67
3.3.2. Conformado de la rueda por rodillos.....	70
3.3.2.1. Secuencia de conformado.....	71
3.3.3. Dispositivo de medida láser OD.....	73
3.3.4. Control electrónico de la máquina de conformado de la rueda.....	74
3.3.5. Deformación del velo de la rueda.....	74
3.3.6. Control de las dimensiones de la rueda con máquina de medida láser 3-D.....	76
3.3.7. Sistema del proceso de control.....	78
3.3.8. Tratamiento térmico.....	78

## **CAPÍTULO 4. MANTENIMIENTO DE RUEDAS.....81**

4.1. Introducción.....	81
4.2. Defectos en ruedas ferroviarias.....	82
4.2.1. Esfuerzos existentes en ruedas.....	82
4.2.2. Categorías de daño.....	84
4.2.2.1. Desgaste en la banda de rodadura (HW).....	85
4.2.2.2. Desgaste de la pestaña (FW).....	87
4.2.2.3. Pérdida de circularidad de la rueda.....	88
4.2.2.4. RCF, Rolling Contact Fatigue. RCF1, RCF2, RCF3 y RCF4.....	90
4.2.2.4.1. Zona 1. RCF1.....	92



## ÍNDICE

4.2.2.4.2. Zona 2. RCF2.....	93
4.2.2.4.3. Zona 3. RCF3.....	94
4.2.2.4.4. Zona 4. RCF4.....	95
4.2.2.5. RCF Clusters. CLUS.....	96
4.2.2.6. Fatiga Subsuperficial. SUB.....	97
4.2.2.7. Deformación lateral en la banda de rodadura.TRO.....	99
4.2.2.8. Colapso local de la banda de rodadura.....	100
4.2.2.9. Planos de rueda. FLT.....	101
4.2.2.10. Formación de martensita después de un deslizamiento. SLP.....	103
4.2.2.11. Sobrecarga térmica. HOT.....	104
4.2.2.12. Fisuras térmicas laterales. LAT.....	105
4.2.2.13. Marcas en la banda de rodadura. INDT.....	106
4.2.2.14. Deformación de la punta de la pestaña.....	107
4.2.2.15. Desprendimientos en la pestaña.....	108
4.2.2.16. Defectos en el velo.....	109
4.2.2.17. Defectos en el cubo.....	111
4.2.3. Mecanismos de agrietamiento de ruedas de tren.....	111
4.2.3.1. Fisuras superficiales (“Spalling”).....	113
4.2.3.1.1. Fisuras superficiales producidas por deslizamiento de ruedas.....	114
4.2.3.1.2. Fisuras superficiales producidas por deformación plástica en la superficie de la banda de rodadura.....	115
4.2.3.2. Fisuras subsuperficiales. Exfoliaciones. (“Shelling”).....	115
4.2.3.3. Fisuras internas por inclusiones profundas (“Shattering”).....	117
4.2.3.4. Fisuras térmicas.....	119
4.2.4. Pautas a seguir.....	120
4.3. Predicción de vida por inicio de fisuras por fatiga en ruedas ferroviarias.....	122
4.3.1. Modelo de elementos finitos en el contacto rueda-carril.....	122
4.3.2. Ejemplo numérico.....	124
4.3.3. Estudios paramétricos.....	129
4.3.3.1. Diámetro de la rueda.....	129
4.3.3.2. Cargas verticales.....	130
4.3.3.3. Dureza del material.....	130
4.3.3.4. Resistencia a fatiga.....	132
4.3.3.5. Ductibilidad del material.....	133
4.4. Conclusión.....	135



## **CAPÍTULO 5. MECÁNICA DE FRACTURA APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS.....137**

5.1. Introducción.....	137
5.2. Medida de la tenacidad de fractura.....	138
5.2.1. Medida de $K_{IC}$ con el método estándar.....	141
5.2.2. Medida de $K_{IC}$ con otros parámetros.....	145
5.2.2.1. Integral-J.....	146
5.2.2.2. $K_{EE}$ , Metodología de energía equivalente.....	147
5.2.2.3. $K_Q$ , Tenacidad de fractura en términos de $K_Q$ .....	148
5.2.3. Valores obtenidos de tenacidad de fractura.....	149
5.3. Aplicación de la mecánica de fractura en la producción de ruedas.....	154
5.3.1. Dispositivos utilizados para aplicar los nuevos criterios de la mecánica de fractura y mejorar las normas de calidad del acero.....	156
5.3.2. Relación entre $K_{IC}$ y la microestructura.....	160
5.3.2.1. Inclusiones.....	160
5.3.2.2. Espacio entre capas.....	161
5.3.2.3. Tamaño de grano.....	162
5.3.2.4. Ferrita en borde de grano.....	162
5.3.2.5. Posibles problemas.....	163
5.3.2.6. Estructura de Bainita.....	164
5.3.2.7. Homogeneidad.....	164
5.4. Resultados.....	165
5.5. Conclusiones.....	177

## **CAPÍTULO 6. INCLUSIONES EXISTENTES EN ACEROS DE RUEDAS FERROVIARIAS.....179**

6.1. Introducción.....	179
6.2. Descripción del proceso.....	180
6.2.1. Horno eléctrico (EAF).....	180
6.2.2. Cuchara (LF).....	181
6.2.3. Desgasificador al vacío (VD).....	182
6.3. Inclusiones en el acero fundido.....	184
6.4. Inclusiones en lingotes solidificados.....	188
6.4.1. Producción de lingotes y toma de muestras.....	189
6.4.2. Métodos de detección de inclusiones por ultrasonidos.....	191
6.4.3. Métodos de detección en el lingote con microscopio y SEM.....	192
6.4.4. Cantidad de inclusiones y distribución de tamaños.....	194
6.4.5. Tipos de inclusiones. Composición.....	197
6.4.5.1. Racimos de alúmina pura.....	197



## ÍNDICE

6.4.5.2. Inclusiones de alúmina pura.....	199
6.4.5.3. Racimos de alúmina con inclusiones nocivas.....	199
6.4.5.4. Inclusiones de $\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{MgO}$ .....	200
6.4.5.5. Inclusiones nocivas procedentes de la boquilla de la cuchara.....	201
6.4.5.6. Inclusiones procedentes del molde.....	202
6.4.5.7. Inclusiones con base de sílice.....	202
6.4.5.8. Inclusiones con forma de burbuja.....	203
6.4.5.9. Cavidades y agujeros.....	205
6.4.5.10. Inclusiones de sulfuros.....	207
6.4.5.11. Resumen de fuentes de inclusiones en lingotes.....	207
6.5. Resumen y conclusiones.....	208
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>211</b>
<b>CAPÍTULO 8. TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>215</b>
<b>CAPÍTULO 9. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>217</b>
9.1. Referencias.....	217
9.2. Bibliografía.....	221
<b>LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....</b>	<b>225</b>
Lista de figuras.....	225
Lista de tablas.....	230







# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

No existe material que esté libre de defectos, incluso recién fabricados por los mejores métodos disponibles, contienen inclusiones, precipitados, poros o bordes de grano. Defectos a partir de los cuales se desarrollan fisuras, que dependiendo del nivel de tensiones se propagan hasta poder llegar a fracturar el componente, o se detienen en la primera barrera microestructural, bordes de grano o inclusiones.

Un lugar crítico en una pieza es su superficie, ya que en algún lugar de ella se encuentran las tensiones máximas (probablemente junto a algún concentrador de tensiones). En estas zonas se pueden desarrollar microdefectos superficiales debido a la deformación plástica alternada, por las picaduras existentes por la oxidación o por un mal mecanizado.



## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

Tanto los defectos internos como superficiales compiten por romper a la pieza. Cuando las cargas son muy altas, superando el límite elástico y produciendo deformaciones plásticas apreciables en cada ciclo, ganan los defectos internos al ser de mayor tamaño. Si las cargas son más reducidas suelen ganar los defectos superficiales pues tienen la ventaja de tener mayor velocidad de crecimiento de la fisura ayudados por la oxidación.

Cuando las fisuras tienen un tamaño muy reducido su velocidad de propagación es muy baja ya que las fuerzas directrices son pequeñas. Durante buena parte de la vida de una pieza las microgrietas resultan invisibles para las técnicas de inspección más habituales, llamándose este periodo de nucleación de fisuras. Por el contrario, cuando la fisura es grande es cuando mayor es su velocidad de propagación.

Para evitar el desarrollo de fisuras a partir de defectos en la superficie, conviene realizar a la pieza un buen acabado superficial y dotar a la superficie con tensiones residuales compresivas. De esta forma son los defectos internos los que generarán fisuras que pueden llegar a pérdidas de material. Cuando una pieza se diseña para soportar un elevado número de ciclos habitualmente morirá por un defecto generado en su superficie.

Durante el proceso de elaboración del acero utilizado para la fabricación de ruedas ferroviarias se generan inclusiones no-metálicas, ya sea por las reacciones producidas en el baño metálico por ejemplo durante la desoxidación, como por la interacción del baño con agentes externos, como pueden ser refractarios o escoria. Estas inclusiones reducen las propiedades mecánicas de las ruedas al actuar como zonas de concentración de tensiones, zonas de inicio y por tanto propagación de fisuras por fatiga. En consecuencia, el principal objetivo de este proyecto es la determinación de las inclusiones y defectos presentes en los aceros utilizados en la producción de ruedas ferroviarias.

En la producción de ruedas ferroviarias se deben tener en cuenta el material de las ruedas, siendo muy importante la calidad del acero utilizado para evitar que las fisuras empiecen a crecer a partir de defectos existentes en dicho material, las propiedades mecánicas como resistencia y tenacidad de fractura, y los métodos de ensayo acorde a los criterios de la mecánica de fractura para ruedas de ferrocarril.

## 1.2. MOTIVACIÓN

Las piezas sometidas a repetidos ciclos de carga y descarga están sometidas a fatiga. Estas piezas se debilitan a lo largo del tiempo y si además tienen defectos en su interior, éstos actúan como concentradores de tensión acelerando la formación y crecimiento de las fisuras.

El fenómeno de fatiga bajo cargas de contacto en servicio, conocido en la mayoría de la bibliografía por su denominación en inglés “Rolling Contact Fatigue” o con las siglas RCF es un tema cada vez más importante en el mundo del ferrocarril, existiendo varias razones para ello. Quizá la más obvia es la posible aparición de fallos catastróficos que pueden resultar muy costosos tanto desde un punto de vista económico como, más importante aún, desde un punto de vista humano. Sin embargo, sin llegar a que estos fallos sean catastróficos, la aparición temprana de grietas, puede resultar muy cara económicamente en lo que se refiere a mantenimiento de los trenes, provocando esto, la necesidad de mayores inversiones en vehículos para poder garantizar el mismo servicio al cliente. Un fallo de este tipo se muestra en la figura siguiente.



Figura 1. Desprendimiento en llanta por RCF

Por tanto, las inspecciones serán necesarias para detectar la aparición de fisuras tempranas y prevenir así posibles fallos. Lo mejor para entender y predecir la formación de estas grietas por fatiga es planear las inspecciones, de forma que se ahorrará dinero y se reducirán las alteraciones operacionales.

La necesidad de detectar lo mejor posible la aparición y crecimiento de las fisuras surge de varias cuestiones y todas relacionadas entre si.



Primero por razones de seguridad. Un fallo que se produzca durante la circulación puede provocar el descarrilamiento del tren y con ello consecuencias fatales.

Otro punto muy importante es la competitividad actual en el mundo del transporte. La velocidad de servicio de los vehículos ferroviarios está aumentando actualmente. Si a este aumento de velocidad se añade el confort, el ferrocarril gana en competitividad respecto a otros medios de transporte. Y más aun, con el futuro cumplimiento del Protocolo de Kyoto, donde se quiere fomentar el uso de medios de transporte menos contaminantes, el ferrocarril puede ver incrementada su utilización de manera notable.

El aumento de la velocidad implica el aumento de las cargas que soportan las ruedas y la frecuencia del movimiento oscilatorio. De esta manera el fenómeno de fatiga está más presente en la dinámica de estos vehículos, agravada por la existencia de defectos en el material de las ruedas ferroviarias.

Es importante conocer los defectos mayoritarios en las ruedas ferroviarias y la causa de estos defectos, normalmente por la presencia de inclusiones no metálicas, ya que actualmente existen problemas por la existencia de fisuras que llegan a fracturar ruedas del parque ferroviario actual, incluso con bajo número de kilometraje.

### **1.3. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este proyecto es determinar los defectos presentes en los aceros utilizados en la producción de ruedas ferroviarias y los métodos existentes para reducir su número lo máximo posible, aunque como es sabido es imposible la fabricación de un material libre de defectos.

Para conocer los tipos de defectos que pueden producirse en las ruedas debido en gran medida a la presencia de inclusiones en los aceros, se van a desarrollar todos los principales tipos de fallos que existen en las ruedas. Conociendo los tipos de fallos en ruedas se puede idear un plan de mantenimiento de ruedas ayudado por la información aportada por programas de elementos finitos sobre el daño acumulado en ruedas en servicio.

Dependiendo de la tenacidad de fractura y de la microestructura de la rueda, las fisuras que nuclean principalmente en las inclusiones podrán crecer o permanecer en la



## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

fase de nucleación hasta que la rueda agote su vida. Por tanto se estudiarán los valores de tenacidad de fractura en ruedas, relacionando fallos en ruedas con este parámetro y con la microestructura.

Finalmente se desarrollarán los métodos de producción del acero y los métodos existentes para aumentar la calidad del acero, eliminando lo máximo posible el número de inclusiones. En este apartado se detallarán la composición, distribución de tamaños, localizaciones y fuentes de dichas inclusiones.



## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**



## **CAPÍTULO 2**

# **ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE LA FRACTURA Y FATIGA**

Toda máquina o estructura debe cumplir los requisitos de diseño que le permitan realizar las funciones para las cuales fue diseñada de la forma más eficiente posible. Sin embargo, se producen fallos en servicio, los cuales pueden llegar a tener consecuencias catastróficas tanto desde el punto de vista humano como desde el económico. Los tipos de fallo en servicio más comunes son los siguientes:

- Plastificación.
- Inestabilidad plástica.
- Pandeo.
- Fluencia.
- Corrosión.
- Desgaste.
- **Fractura y Fatiga: 80% de los casos.**
- Acciones combinadas:

Corrosión-Desgaste  
Corrosión-Fatiga  
Corrosión bajo tensión.

Como puede observarse, los fallos por fractura y fatiga suman un importante porcentaje de los fallos en servicio producidos, por lo que el estudio y desarrollo de la Mecánica de la Fractura y el fenómeno de Fatiga es de especial importancia.

Algunos ejemplos de fallos en servicio, de consecuencias catastróficas tanto desde el punto de vista humano como del económico, producidos por la combinación de fatiga y fractura mecánica son los siguientes.



Figura 1. Rotura de depósito de gas natural licuado. Cleveland, 1944. 128 muertos





Figura 2. Rotura del fuselaje de un avión Comet (1954), por la propagación de una fisura desde la esquina de una ventana



Figura 3. Rotura del fuselaje de un avión Boeing 737 (1988), por la propagación de fisuras por oxidación en zonas remachadas

#### 2.1.1. DEFECTOS Y CONCENTRACIÓN DE TENSIONES

Desde un punto de vista teórico, la rotura de un material viene determinada por la aplicación de esfuerzos sobre el mismo que conlleven un valor de tensión que supere la resistencia mecánica del material en cuestión. Sin embargo, este planteamiento sencillo es válido y útil para la determinación del fallo de elementos de geometría muy simple

en los que la tensión se reparte por el mismo de forma homogénea, como es el caso del ensayo de tracción de probetas normalizadas en laboratorio.

En los casos reales, sin embargo, no se da una distribución homogénea de tensiones en el material, sino que las formas geométricas de las piezas, la posición y distribución de los esfuerzos, y la presencia de discontinuidades en el material, generan un estado tensional heterogéneo, con zonas altamente tensionadas y zonas más relajadas. Así, resulta imposible determinar de forma simple la configuración en que se produce la rotura de un elemento en base a criterios de tensión.

Estas discontinuidades de material, también denominadas defectos, existen en mayor o menor medida en todas las piezas de máquinas o estructuras. Otra característica importante de los defectos es que son exclusivos en cada pieza, es decir, que dos piezas distintas tienen defectos distintos incluso siendo de la misma partida de producción. Estos defectos pueden ser poros, inclusiones, precipitados, bordes de grano...y a partir de ellos se forman fisuras que luego pueden propagarse de forma estable (fisura subcrítica) o inestable (fisura crítica). El origen de las fisuras puede producirse en la fase de fabricación, montaje o de operación.

Estos defectos o fisuras son los causantes del estado tensional heterogéneo del material debido al fenómeno de concentración de tensiones. Un clásico ejemplo de este fenómeno es el del taladro en una placa sometida a tracción, figura 4.

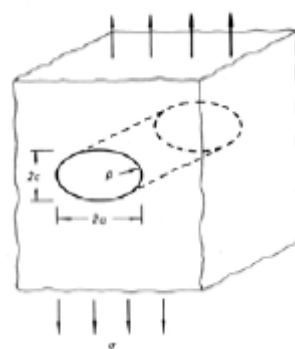


Figura 4. Campo de tensiones en un defecto

La teoría de la elasticidad nos dice que la tensión máxima se produce en los bordes del taladro y con un valor de tres veces la tensión remota. Este resultado indica que en los alrededores del taladro se produce una concentración de tensión pudiéndose cuantificar a través del parámetro  $K$ , factor de concentración de tensiones.

$$\sigma_{\max} = 3\sigma \rightarrow \sigma_{\max} = K \cdot \sigma$$

$K_t$  = Factor de concentración de tensiones

La teoría de la elasticidad también nos permite establecer una expresión analítica de este factor, para ello se parte de la hipótesis de que el defecto presenta una geometría elíptica de semieje mayor  $a$  y radio de curvatura  $\rho$ , figura 5:

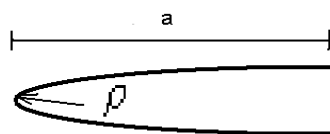
$$K \approx \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right)$$


Figura 5. Factor de concentración de tensiones

El caso extremo de concentración de tensiones se produce cuando se está frente a una fisura de radio de curvatura nulo. En ese caso el factor de concentración de tensiones se hace infinito y ningún material resistiría las tensiones aplicadas. Lógicamente no rompen todas las piezas y esto es debido a que el estado tensional en los bordes de estos defectos produce la plastificación del material en las zonas adyacentes a los defectos tal y como se muestra en la figura 6.

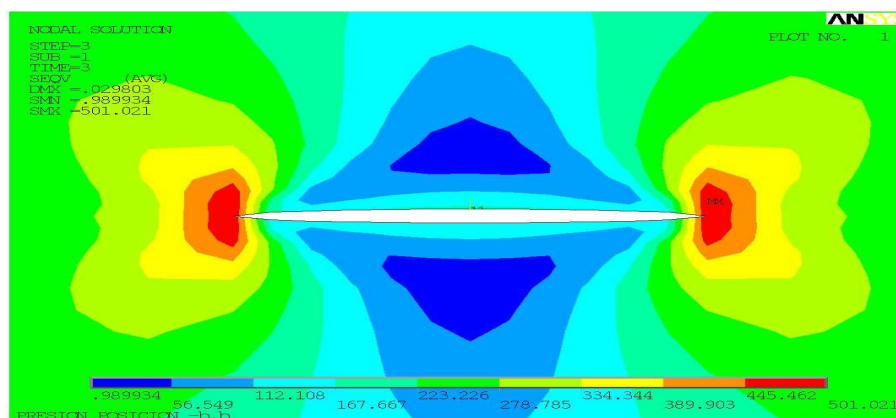


Figura 6. Zona plástica en los bordes del defecto

### **2.1.2. MECANISMOS DE FRACTURA**

Los principales tipos de mecanismos de fractura son la fractura frágil, clivaje, y la fractura dúctil, por coalescencia de microcavidades. La figura 7 muestra un ejemplo de ambos tipos de fractura.



Figura 7. Fractura dúctil vs Fractura Frágil

#### **2.1.2.1. FRACTURA FRÁGIL: CLIVAJE**

La fractura frágil, o fractura por clivaje, consiste en la propagación de grietas mediante la apertura de planos cristalográficos. La superficie de rotura es plana y brillante tendiendo a situarse perpendicular a la tensión principal máxima. En este tipo de fallo no se observa deformación plástica considerable así como tampoco hay una absorción de energía importante. El clivaje se inicia a partir de inclusiones y/o precipitados produciéndose la rotura de enlaces a través de los granos (clivaje transgranular) o a través de los bordes de grano (clivaje intergranular).

#### **2.1.2.2. FRACTURA DÚCTIL: COALESCENCIA DE MICROCAVIDADES**

La fractura dúctil se produce a partir de microcavidades cuya formación se ve facilitada por la presencia de inclusiones y precipitados. Posteriormente se produce la coalescencia de estos defectos por estricción de los ligamentos de material que los rodean. La superficie de rotura es rugosa, debido a las deformaciones plásticas producidas, y mate tendiendo a orientarse en dirección de la máxima tensión de cortadura (a 45° de la tensión principal máxima). La figura 8 muestra un esquema del proceso de fractura dúctil.

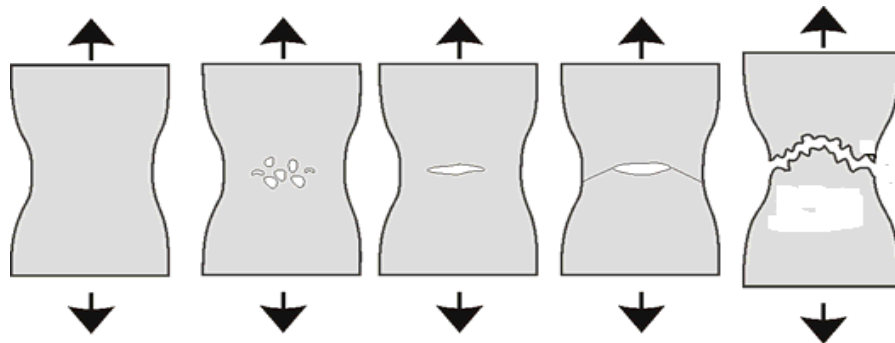


Figura 8. Fractura Dúctil. Coalescencia de microcavidades

### 2.1.3. MECÁNICA DE LA FRACTURA

#### 2.1.3.1. CRITERIOS DE DISEÑO

El criterio convencional de diseño consiste en comparar la tensión aplicada,  $\sigma$ , con la tensión máxima que resiste el material,  $\sigma_R$ . Tal y como se muestra de forma esquematizada en la figura 9.

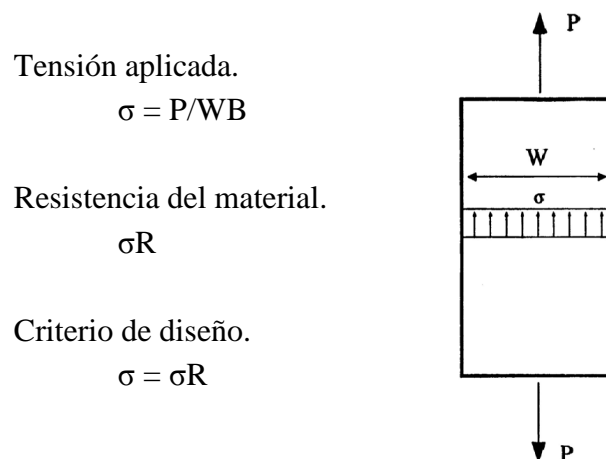


Figura 9. Criterio convencional de diseño

Sin embargo, este criterio no funciona para elementos fisurados puesto que estas piezas fallan con magnitudes de tensión inferiores a la tensión de rotura del material, figura 10. Este fenómeno obliga a buscar alternativas a los criterios convencionales de diseño desarrollándose los criterios de fractura.

Tensión media aplicada.

$$\sigma = P/(W-a)B$$

Resistencia del material.

$$\sigma_R$$

El componente falla con

$$\sigma < \sigma_R$$

Criterio de diseño:

$$K < K_c$$

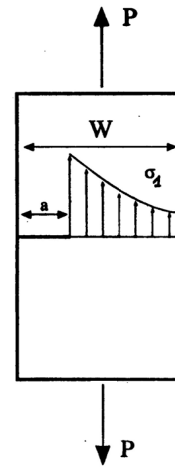


Figura 10. Criterios no convencionales de diseño

### 2.1.3.2. CRITERIO DE FRACTURA

Para el caso de piezas fisuradas, el criterio de diseño convencional ha sido sustituido por el siguiente criterio de fractura:

$$K = K_c$$

Donde K representa al factor de intensidad de tensiones el cuál depende de la geometría de la pieza, las cargas exteriores aplicadas y la longitud de la fisura quedando una expresión de la siguiente forma:

$$K = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{(\pi a)}$$

Donde  $\beta$  es una constante que depende de la geometría,  $\sigma$  es la tensión aplicada y  $a$  es la longitud de la fisura.

Por su parte  $K_c$  representa al factor de intensidad de tensiones crítico que depende del material de la pieza, el espesor de la misma, la temperatura y la velocidad de sollicitación.

Tanto K como  $K_c$  tienen de unidades  $[\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}]$

Cuando  $K_c$  cumple las condiciones de deformación plana dominante (asociado al espesor) y estado de cargas cuasiestáticos recibe el nombre de Tenacidad de Fractura.

#### 2.1.3.3. MODOS DE FRACTURA

La propagación de fisuras puede producirse de tres modos distintos. El primero de ellos, Modo I (figura 11), se denomina modo de apertura y los labios de la fisura se desplazan en la dirección perpendicular al plano de la fisura en sentidos opuestos.

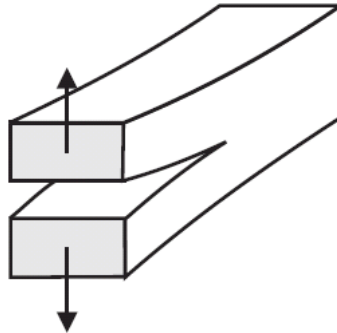


Figura 11. Modo I: Apertura

En el segundo modo de propagación de fisuras, Modo II Deslizamiento, los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma en la dirección longitudinal y sentidos opuestos, tal y como se muestra en la figura 12.

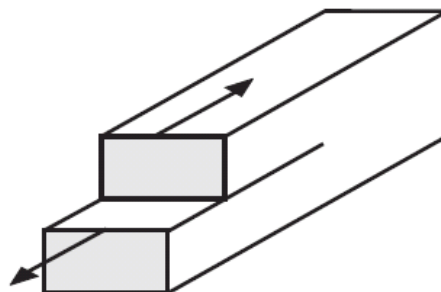


Figura 12. Modo II: Deslizamiento

Finalmente, en el Modo III Desgarro, los labios de la fisura se desplazan por el plano de la misma en la dirección transversal y sentidos opuestos, tal y como se muestra en la figura 13.

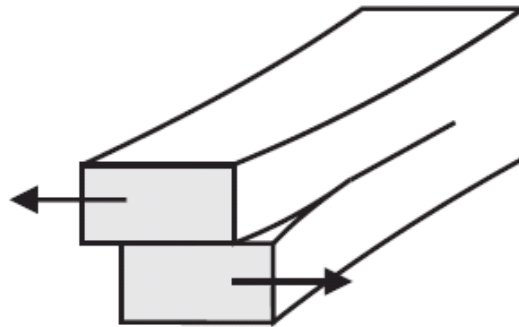


Figura 13. Modo III: Desgarro

En la práctica es difícil encontrar un caso de propagación de fisuras que se produzca en un único modo. Lo habitual es encontrar situaciones en las que se combinen dos o incluso los tres modos. A estas situaciones se las denomina Modos mixtos de Fractura.

Por otro lado, se puede determinar un valor de la tenacidad de fractura para cada uno de los modos por lo que además de la magnitud de la misma es necesario indicar el modo al cual se corresponde de la siguiente manera:

$K_{IC}$  = Tenacidad de Fractura modo I

$K_{IIC}$  = Tenacidad de Fractura modo II

$K_{IIIC}$  = Tenacidad de Fractura modo III

#### 2.1.4. FENÓMENO DE FATIGA

El fenómeno de fatiga podría definirse como la acumulación de daño generada por la aplicación sucesiva de cargas de carácter cíclico. Este fenómeno se puede dividir en dos fases, nucleación de fisuras y propagación de las mismas.

##### 2.1.4.1. NUCLEACIÓN DE FISURAS

La nucleación de fisuras consiste en la formación de microgrietas a partir de defectos internos del material tales como inclusiones, precipitados, poros... También puede producirse en la superficie del material, caso más habitual, a partir de microdefectos debidos a las deformaciones plásticas alternantes, picaduras de óxido o a un mal acabado superficial. Esta fase es la que consume un mayor número de ciclos (o



vida a fatiga del material) y las fisuras no son detectables, por su pequeño tamaño, por los métodos de inspección actuales.

### 2.1.4.2. PROPAGACIÓN DE FISURAS

La propagación de fisuras puede dividirse en dos etapas, propagación estable y propagación inestable, que sumadas a la fase de nucleación se representan en la figura 14.

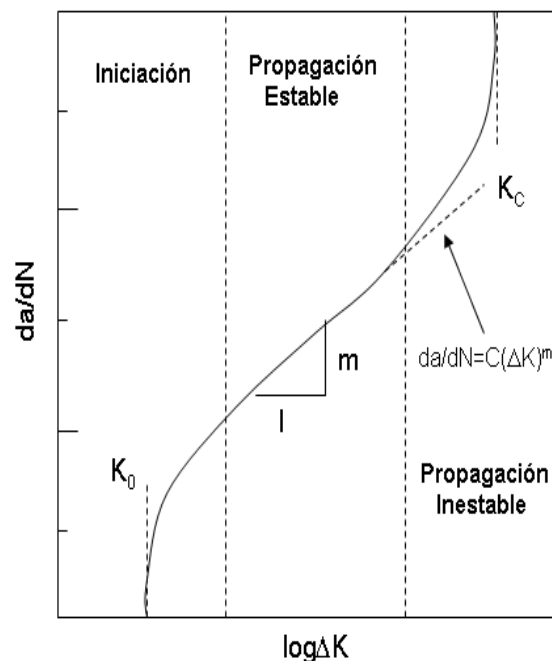


Figura 14. Etapas de propagación de fisuras

La iniciación del proceso se produce generalmente en la superficie de la pieza por deslizamientos y oxidación y con un modo de propagación mixto suma de los modos I y II.

Existe un valor límite, denominado umbral de fatiga  $\Delta K_0$ , por debajo del cuál la fisura no progresa o lo hace a una velocidad tan reducida que se puede considerar tiempo de vida a fatiga ilimitado.

En la segunda etapa, propagación estable, la fisura se orienta y se propaga en modo I generándose las denominadas playas de fatiga, y en escala logarítmica esta etapa se puede ajustar a una recta. La ley de Paris-Erdogan permite el estudio de esta etapa de propagación a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m$$

Donde  $a$  es el tamaño característico de la fisura,  $N$  es el número de ciclos y  $C$  y  $m$  son constantes que dependen del material y el medio.

En la última etapa, propagación inestable, el tamaño de la grieta aumenta y con ello el valor del factor de intensidad de tensiones  $K_I$  el cuál se aproxima al valor del factor de intensidad de tensiones crítico, o en su caso al de la tenacidad de fractura, aumentándose por ello la velocidad de propagación. Cuando el valor de  $K_I$  se iguala a  $K_{IC}$  se produce la rotura catastrófica del material. En general, esta etapa consume un número reducido de ciclos. En la figura 15 se muestra la forma que suelen presentar las superficies de fractura para este tipo de casos.

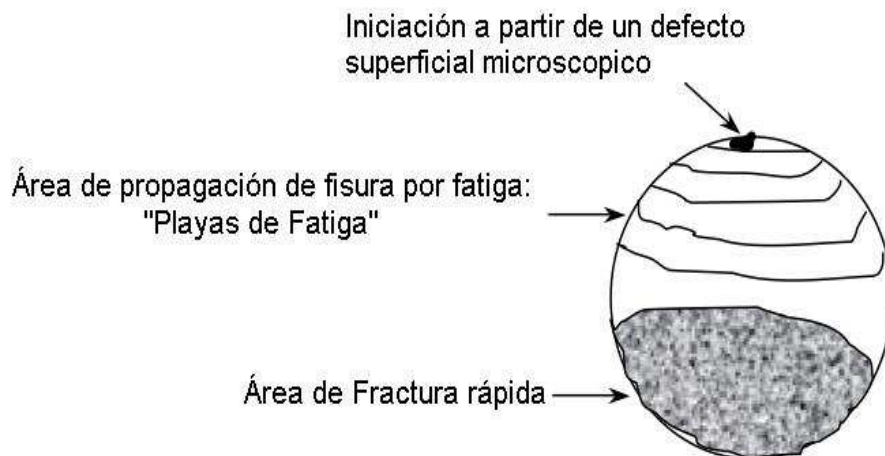


Figura 15. Etapas de fatiga

#### 2.1.4.3. ALTO NÚMERO DE CICLOS VS BAJO NÚMERO DE CICLOS

Se denomina proceso de fatiga a bajo número de ciclos, o bajo ciclaje, cuando el fallo se produce generalmente a menos  $10^3$  ciclos. Para ellos las magnitudes de la carga deben ser similares a la carga de rotura del material. El proceso se inicia en el interior de la pieza a partir de sus defectos internos propagándose las fisuras hacia el exterior hasta producir el fallo catastrófico por exceso de carga en la sección remanente.

El proceso de fatiga a alto número de ciclos, o alto ciclaje, puede llegar a valores de  $10^7$  ciclos antes de producirse el fallo. Las magnitudes de carga son sensiblemente inferiores a la carga de rotura del material. El proceso de fatiga se inicia en alguna de las

superficies exteriores de la pieza en zonas de concentración de tensiones (entallas, picaduras de óxido...) propagándose las fisuras hacia el interior de la pieza hasta producir la rotura catastrófica por sobrecarga de la sección resistente restante.

A bajo número de ciclos, no da tiempo a generarse defectos superficiales por lo que son los defectos internos los que inician y controlan el proceso. Mientras que a alto número de ciclos si se dan las condiciones para la formación de fisuras superficiales, las cuales tienen una velocidad de propagación superior a las que se forman a partir de defectos internos, siendo estas fisuras superficiales las que controlan el proceso de daño.

### 2.1.5. CURVAS S-N

#### 2.1.5.1. DEFINICIONES

En primer lugar, se realizan una serie de definiciones necesarias para la correcta aplicación de las curvas S-N dentro del problema de fatiga.

**Carga de amplitud constante:** Carga cuyos niveles de tensión máximo y mínimo se mantienen constantes, figura 16.

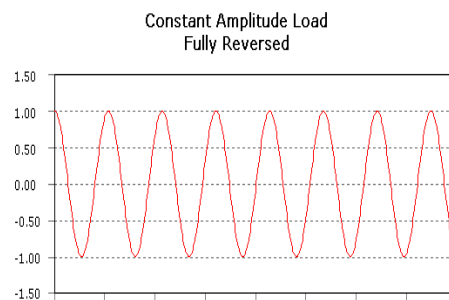


Figura 16. Carga de amplitud constante

**Carga de amplitud variable:** Carga cuyos niveles de tensión máximo y mínimo no se mantienen constantes, figura 17.

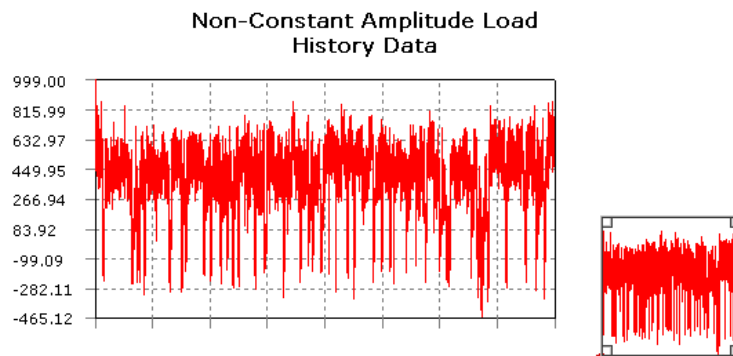


Figura 17. Carga de amplitud variable

**Carga proporcional:** Carga que produce unas componentes de tensión con relación constante de la forma:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \text{constante}$$

**Carga no proporcional:** No hay relación entre las componentes de tensión. Los casos típicos en los que se producen este tipo de carga son:

- Alternancia entre dos casos de carga distintos.
- Carga alternante superpuesta a una carga estática.
- Condiciones de contorno no lineales.

**Rango de tensiones:**

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

**Tensión media:**

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

**Amplitud de tensión o tensión alternante:**

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

**Ratio de tensión:**

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

**Esfuerzo alternante:**

$$\sigma_m = 0 \text{ y } R = -1$$

**Tensión pulsante:**

$$\sigma_m = \sigma_a \text{ y } R = 0$$

**Tensión fluctuante:**

$$\sigma_m > \sigma_a \text{ y } 0 < R < 1$$

**Esfuerzo fluctuante:**

$$\sigma_m < \sigma_a \text{ y } -1 < R < 0$$

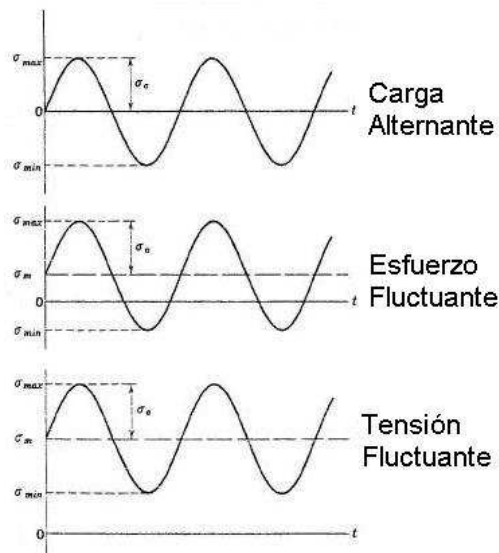


Figura 18. Tipos de cargas

**Curva S-N:** Amplitud de tensión vs Número de ciclos

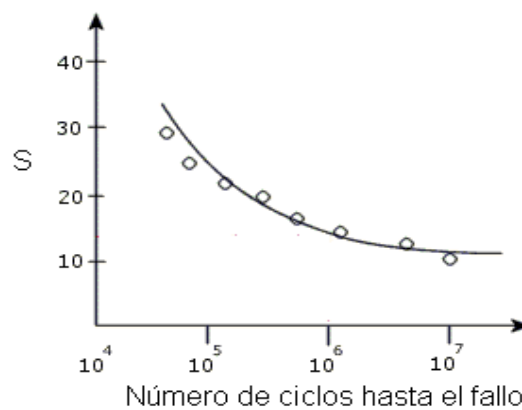


Figura 19. Curva S-N

**Límite a fatiga:** Algunos materiales presentan una curva S-N asintótica horizontalmente a alto número de ciclos, figura 20. Esto quiere decir que hasta una determinada amplitud de tensión el material es inmune al proceso de fatiga. Esto es debido a que con carga de tan baja intensidad la velocidad de propagación de fisuras es próxima a 0 o nula. Este fenómeno se da en algunas aleaciones ferrosas o de Titanio.

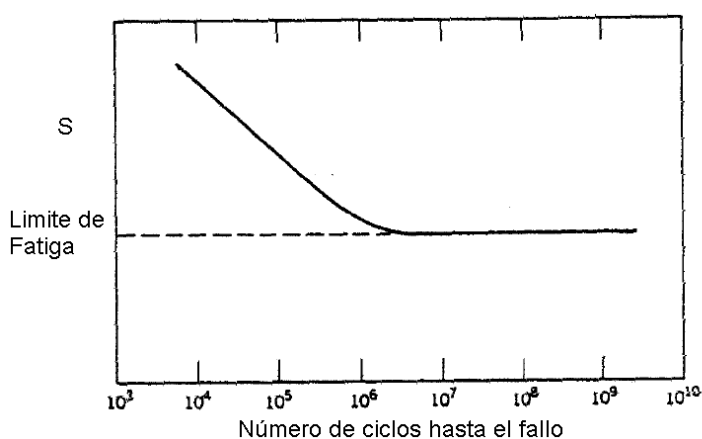


Figura 20. Curva S-N con límite de fatiga

#### 2.1.5.2. FACTORES QUE MODIFICAN LAS CURVAS S-N

- **Tensiones medias:** En general las Curvas S-N se presentan para casos de carga alternante ( $\sigma_m = 0$  y  $R = -1$ ). Las tensiones medias modifican la vida a fatiga. Si las tensiones medias son positivas, a tracción, la vida a fatiga disminuye desplazando hacia la izquierda la curva S-N.
- **Concentración de tensiones:** Entallas, cambios de sección... forman zonas de concentración de tensiones que son más sensibles al daño por fatiga desplazando hacia la izquierda la curva S-N. En la práctica se utilizan factores correctores obtenidos de forma experimental para compensar estos efectos.
- **Efectos ambientales:** Como por ejemplo picaduras por corrosión. Estos fenómenos producen defectos superficiales siendo especialmente dañinos por la combinación del daño producido por las cargas alternantes con el daño producido por la corrosión.

#### 2.1.5.3. TEORÍAS CORRECTORAS: GOODMAN, SODERBERG, GERBER

Como se comentó en el anterior apartado, las curvas S-N, en general, se representan para valores nulos de tensión media. Sin embargo, en la práctica, no siempre se cumple este requisito. Cuando se está frente a uno de estos casos existen dos posibilidades. La primera de ellas es realizar el análisis a fatiga con una curva S-N obtenida con el valor de la tensión media del caso real. La otra posibilidad, la más habitual, es trabajar con la curva S-N de tensión media nula y utilizar una de las teorías correctoras. Estas teorías son la de Goodman, Soderberg y Gerber.

La más utilizada es la teoría de Goodman. Esta teoría se basa en ensayos experimentales en los que se mide el número de ciclos que el material aguanta para distintos valores de la tensión media y tensión alternante. Para cada N ciclos se obtiene una representación como la de la figura 21.

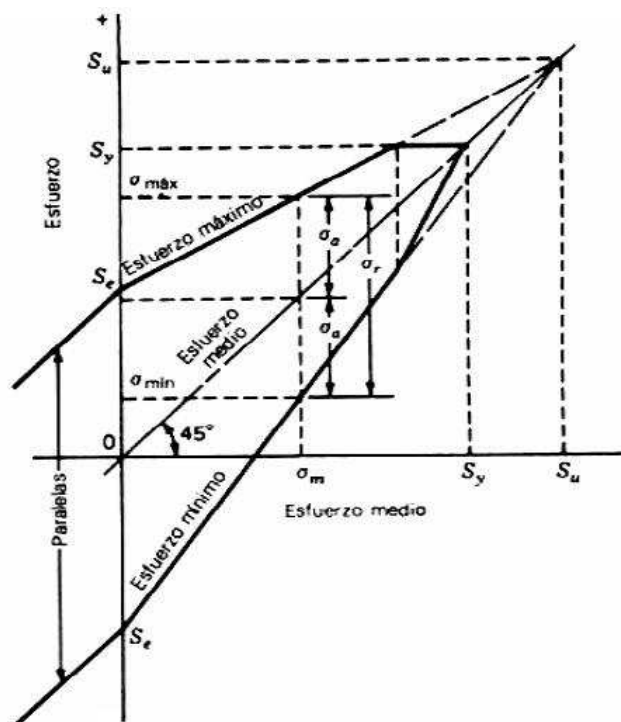


Figura 21. Curva Tensión Vs Tensión media

Como puede observarse a medida que la tensión media aumenta, a tracción, para que el material resista los N ciclos que representa la gráfica es necesario reducir la tensión alternante. Cuando la tensión media es a compresión se mantiene la curva S-N para carga alternante, tensión media nula, como medida conservadora.

La teoría de Goodman propone un ajuste lineal que corrige el efecto de la tensión media. La línea de Goodman tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = 1$$

Donde  $\sigma_a$  es la tensión alternante,  $\sigma_m$  la tensión media,  $S_{ut}$  la resistencia del material y  $S_f$  la tensión alternante para esos N ciclos que propone la curva S-N.

La teoría de Soderberg se basa en los mismos principios que la teoría de Goodman pero utilizando el límite elástico del material,  $S_{yt}$ , en vez de la tensión de rotura,  $S_{ut}$ . Por lo que sus resultados resultan más conservadores. La línea de Soderberg tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = 1$$

La teoría de Gerber propone una aproximación cuadrática a los valores experimentales, parábola de Gerber. Esta es la solución que más se ajusta a la realidad aunque debido a la gran dispersión de los valores experimentales resulta ser poco conservadora. La parábola de Gerber tiene la siguiente expresión:

$$\frac{\sigma_a}{S_f} + \left( \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$

La figura 22 muestra una comparación de las teorías correctoras.

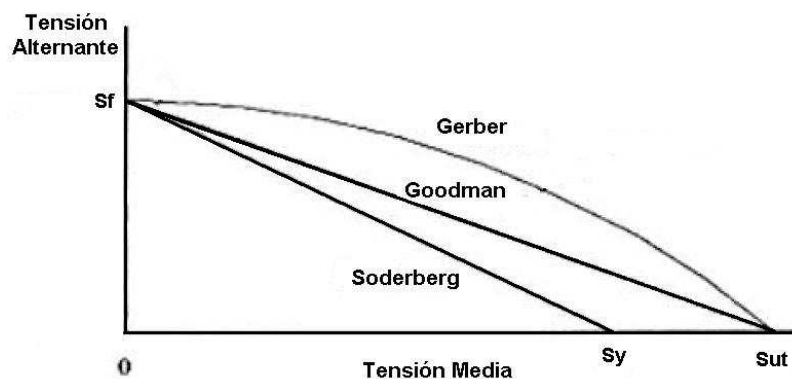


Figura 22. Comparación de las teorías correctoras





En general, la teoría de Goodman se emplea con materiales de poca ductilidad y para cálculos conservadores de materiales dúctiles. La línea de Soderberg, la más conservadora, se emplea para materiales frágiles. Finalmente, la parábola de Gerber es la menos utilizada por ser la menos conservadora, su uso se reduce a materiales muy dúctiles.

## **2.2. INTRODUCCIÓN A LA DINÁMICA FERROVIARIA**

### **2.2.1. MODELOS DE CONTACTO RUEDA-CARRIL**

El fenómeno de Rolling Contact Fatigue implica el conocimiento de otros aspectos que intervienen en la dinámica de vehículos ferroviarios. En primer lugar, será importante conocer como es la geometría de contacto rueda-carril.

Fue Hertz [Hertz, 1895] [1] quien desarrolló la teoría clásica del contacto. Demostró que para el caso en el que las superficies de las ruedas y los raíles fuesen lisas y con una curvatura constante en las proximidades del área de contacto, ésta sería de forma elíptica, y la distribución normal de presión entre la rueda y el raíl en esa área sería semielíptica. Los métodos multi-hertzianos dividen la zona de contacto en franjas y calculan cada una según el contacto de Hertz.

En 1916 Carter [Carter, 1916] [2] introdujo el concepto de pseudo-deslizamiento que tiene lugar entre la rueda y el carril, introduciendo este concepto dentro de la teoría de dinámica lateral. Posteriormente, en 1926, desarrollo una solución para el caso bidimensional de dos cilindros en contacto y las correspondientes fuerzas de rozamiento que se generan [Carter, 1926] [3].

En 1958, Johnson [Johnson, 1958] [4] resolvió el caso tridimensional de una forma aproximada. La solución estaba basada en la hipótesis de que el área de adhesión era circular y tangencial al área de contacto, también circular. Ese mismo año [Johnson, 1958] [5], consideró la influencia del Spin sobre un eje normal al área de contacto.

Haines y Ollerton en 1963 [Haines and Ollerton, 1963] [6] fueron quienes consideraron el caso general de una superficie elíptica y centraron su atención en los pseudo-deslizamientos en la dirección del movimiento asumiendo que la distribución de



## **CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE**

tensiones bidimensional dada por Carter se sustentaba en bandas paralelas a la dirección del movimiento.

Un tratamiento más completo de las fuerzas de rozamiento fue realizado por Vermeulen y Johnson [Johnson and Vermeulen, 1964] [7], dando la relación entre los pseudo-deslizamientos y las fuerzas tangenciales para valores arbitrarios de los semiejes de la superficie de contacto.

Ese mismo año, Kalker [Kalker, 1964] [8] ofreció un tratamiento analítico al problema considerando el coeficiente de Poisson, y en 1967 [Kalker, 1967] [9] proporcionó una solución completa para el caso general tridimensional con pseudo-deslizamientos y spin arbitrarios.

Polach, ha desarrollado un método que trabaja bien con elevados niveles de rozamiento y giro y además incluye la caída del valor del coeficiente de fricción cuando la velocidad de deslizamiento aumenta.

Para solventar estas limitaciones, Kalker desarrolló una teoría exacta que no poseía las limitaciones anteriores: es tridimensional, no lineal, exacta e incluye pseudo-deslizamientos longitudinales, laterales y de giro [Kalker, 1979; Kalker, 1980] [10] [11]. El problema de esta teoría es que es muy costosa computacionalmente

Kalker ideó varios algoritmos informáticos y tablas de resultados en forma adimensional [Kalker, 1973] [12] para el cálculo de las fuerzas de rozamiento de acuerdo con su teoría. El programa CONTACT basado en la teoría exacta de Kalker, el cual incluye contacto no Hertziano, es relativamente lento y no es práctico para usarlo en cada paso de la integración numérica, ya que requiere un gran coste computacional. La tabla de rutinas de interpolación está disponible, como USETAB, la cual interpola entre valores de rozamiento calculados previamente con CONTACT.

Una alternativa a la solución numérica completa del problema es la aproximación, más rápida, aportada por la teoría simplificada de Kalker [Kalker, 1982] [13], la cual es implementada en el ordenador mediante el programa FASTSIM.

El fenómeno de RCF es más reciente. Kalker fue uno de los primeros en desarrollar este concepto. El Dr Coenraad Esveld ha realizado estudios sobre la estabilidad en curva y fuerzas longitudinales. El Dr Zili Li ha desarrollado teorías sobre el Shakedown y el Rolling Contact Fatigue. Ambos en la universidad de Delft, son discípulos de Kalker.



## **CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE**

Entre 1994 y el 2000, Anders Ekberg ha desarrollado importantes estudios sobre la predicción del tiempo de vida en servicio de las ruedas de trenes. En el 2000, desarrollo un modelo numérico para predecir la vida a fatiga considerando imperfecciones del material y cargas probabilísticas.

En 2002, Ekberg, junto a Kabo y Andersson, en la universidad de Chalmers en Suecia, han desarrollado un modelo para la predicción de Rolling Contact Fatigue.

En cuanto a los programas de simulación, las organizaciones ferroviarias han desarrollado diferentes paquetes de software para facilitar el diseño de las suspensiones y la optimización de la vía y de los vehículos. Algunos de ellos forman parte de paquetes más generales que incluyen otros campos de aplicación. La teoría dinámica multicuerpo se usa para desarrollar las ecuaciones del movimiento del sistema y éstas se resuelven proporcionando resultados de gran interés.

Uno de los primeros paquetes completos, MEDYNA (Mehrkörper-Dynamic) fue desarrollado en la Organización de Investigación Aeroespacial Alemana DLR junto con MAN y la Universidad Politécnica de Berlín. MEDYNA está basado en un MBS con pequeños cuerpos rígidos con movimiento relativo respecto a un sistema de referencia global el cual permite grandes desplazamientos. SIMPACK fue desarrollado más tarde por el mismo equipo en DLR y está diseñado para vehículos automóviles y otros sistemas, además de para vehículos ferroviarios. Permite cinemática no lineal desde el principio. Las ecuaciones del movimiento están formuladas en coordenadas relativas.

ADAMS entró en 1995 en el mercado de simulación ferroviaria como ADAMS/rail con licencia de los elementos rueda-carril de MEDYNA.

En los Estados Unidos, la Association of American Railroads (AAR) comenzó el desarrollo del paquete de simulación de propósito general NUCARS (New and Untried Car Analytic Regime Simulation).

El French National Transport Research (INRETS) desarrolló un código de simulación multicuerpo VOCO (Voiture en Courbe) en 1987. Una versión comercial del llamado VOCOLIN en 1991 permitió la simulación del contacto rueda-carril con una aproximación multihertziana.

En el Gran Bretaña British Rail Research se desarrolló VAMPIRE el cual está actualmente mantenido por la AEA Technology Rail.



En Suecia, la modelización de vehículos ferroviarios en ordenador comenzó en ASEA en 1971. En 1992 comenzó el desarrollo de un nuevo programa tridimensional de cálculo y el desarrollo del software fue transferido a una nueva compañía llamada DESolver. Este nuevo código general informático tridimensional, junto con los anteriores pre y postprogramas se convirtieron en 1993 en la nueva herramienta de análisis de un vehículo ferroviario llamada GENSYS.

### 2.2.2. CONCEPTO DE PSEUDO-DESLIZAMIENTO

El movimiento relativo entre dos cuerpos, cuando se utiliza la mecánica clásica, es clasificado en dos tipos:

- Rodadura pura sin deslizamiento.
- Deslizamiento puro. En este tipo de movimiento la fuerza tangencial entre los dos cuerpos alcanza el límite de fricción. Por debajo de este límite no se produce deslizamiento.

Sin embargo, diferentes estudios han descubierto un estado intermedio donde la elasticidad de los cuerpos, que están en contacto, permite dividir la zona de contacto en una zona de adhesión y en una zona de deslizamiento. De tal manera que, por debajo del valor límite de fricción, existe una cantidad finita de deslizamiento entre los dos cuerpos denominado pseudo-deslizamiento. Este deslizamiento es calculado a partir de sus velocidades relativas dividiendo por el valor medio de sus velocidades de giro para dar lugar a un término adimensional.

Los valores de los pseudo-deslizamientos longitudinal, lateral y de giro se calculan a partir de las siguientes expresiones:

$$\xi_x = \frac{\text{velocidad longitudinal real} - \text{velocidad longitudinal de rodadura pura}}{\text{velocidad longitudinal debido a la rodadura}}$$

$$\xi_y = \frac{\text{velocidad lateral real} - \text{velocidad lateral de rodadura pura}}{\text{velocidad lateral debido a la rodadura}}$$

$$\psi = \frac{\text{velocidad angular del cuerpo superior} - \text{velocidad angular del cuerpo inferior}}{\text{velocidad nom. de rodadura}}$$

### 2.2.3. PROBLEMA NORMAL. TEORÍA DE HERTZ

Cuando los materiales de dos sólidos en rodadura tienen características elásticas idénticas el problema normal es independiente del problema tangencial.

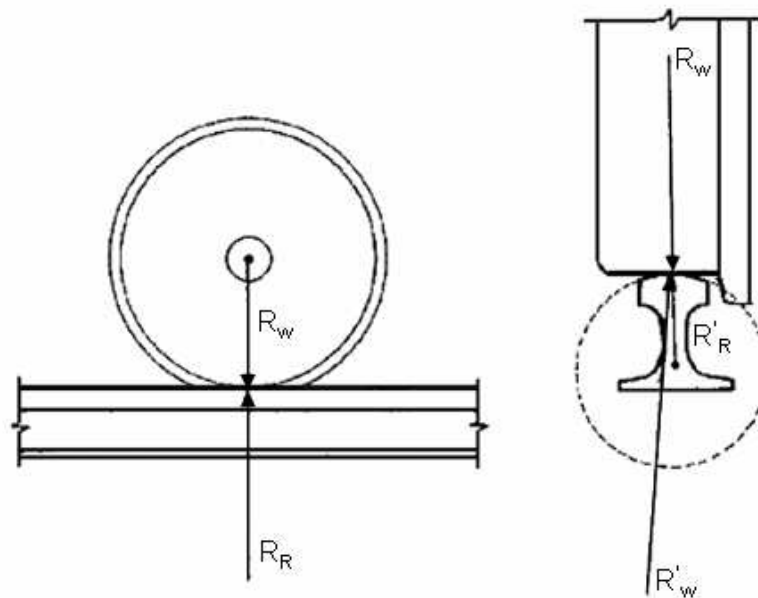


Figura 23. Radios de curvatura de la rueda y del carril.

En el caso de un vehículo ferroviario rodando sobre una vía, los materiales de las ruedas y del carril tienen propiedades elásticas análogas, por lo que se puede separar el problema normal del tangencial. De tal manera que, la fuerza normal y la forma de la zona de contacto se obtienen resolviendo el problema normal, y las fuerzas que se producen en el contacto se obtienen resolviendo el problema tangencial. En estas condiciones el problema normal se resuelve mediante la teoría de Hertz [14].

Hertz, guiado por las observaciones experimentales, consideró que la superficie de contacto entre dos superficies era elíptica de semiejes  $a$  y  $b$  de valores:



## CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

$$a = m \cdot \left[ \frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3}$$

$$b = n \cdot \left[ \frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3}$$

tal que:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi \cdot E_w} \quad K_2 = \frac{1 - \nu_R^2}{\pi \cdot E_R}$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} + \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right)$$

donde (ver figura 23):

$N$  es la fuerza normal total aplicada en la zona de contacto.

$R_w$  es el radio de curvatura principal de la rueda.

$R'_w$  es el radio de curvatura transversal principal del perfil de la rueda en el punto de contacto.

$R_R$  es el radio de curvatura principal del carril en el punto de contacto.

$R'_R$  es el radio de curvatura transversal principal del perfil del carril en el punto de contacto.

$\nu_w, \nu_R$  son los coeficientes de Poisson de la rueda y del carril, respectivamente.

$E_w, E_R$  son los módulos de Elasticidad de Young de la rueda y del carril, respectivamente.

$m, n$  son dos coeficientes que dependen del ángulo  $\theta$  y cuyos valores se obtienen de la Tabla , tal que:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{K_4}{K_3} \right)$$

y



$$K_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} \right)^2 + \left( \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{1}{R_w} - \frac{1}{R'_w} \right) \cdot \left( \frac{1}{R_R} - \frac{1}{R'_R} \right) \cdot \cos(2 \cdot \vartheta) \right]$$

Donde  $\vartheta$  es el ángulo que forman los planos normales que contienen a las curvaturas  $1/R_w$  y  $1/R_R$ .

$\theta$ (°)	m	n	$\theta$ (°)	m	n	$\theta$ (°)	m	N
0.5	61.4	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.486	0.717
1	36.89	0.1314	20	3.813	1.4123	65	1.378	0.759
1.5	27.48	0.1522	30	3.731	0.493	70	1.284	0.802
2	23.26	0.1691	35	3.397	0.530	75	1.202	0.846
3	16.5	0.1964	40	3.136	0.567	80	1.128	0.893
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.604	85	1.061	0.944
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.641	90	1.000	1.000
8	7.86	0.285	55	1.611	0.678			

Tabla 1. Valores de m y n en función de  $\theta$

Los valores de los semiejes, a y b, de la superficie de contacto dependen de la carga normal (N) que actúa sobre ella. Para calcular el valor de esta carga es necesario conocer la distribución de presiones que se tiene en la zona de contacto, de tal manera que luego integrando esta distribución a lo largo de toda esta superficie se obtiene el valor de la carga normal (N).

Hertz consideró que la distribución de presiones en una región elíptica venía dada por la siguiente expresión:

$$p(x, y) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$$

Esta distribución de presiones es compatible con los desplazamientos normales que se producen en la superficie de contacto entre los dos cuerpos. Conociendo la distribución de presión semi-elipsoidal y el volumen de una elipsoide, se puede obtener la carga total normal que está actuando, en función de la presión máxima ( $p_0$ ):

$$N = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot p_0}{3}$$

## 2.2.4. PROBLEMA TANGENCIAL

### 2.2.4.1. TEORÍA DE JONSON & VERMEULEN

Esta teoría, desarrollada por Johnson en 1958, era una teoría tridimensional que analizaba el caso de dos esferas rodando una sobre otra. La superficie de contacto resultante era circunferencial en vez de rectangular que es como consideró Carter. Además, tuvo en cuenta los pseudo-deslizamientos longitudinal y transversal, pero no incluyó la influencia del pseudo-deslizamiento de giro.

En 1964 Johnson y Vermeulen extendieron esta teoría para un espacio en forma elíptica [7]. La superficie de contacto estaba dividida asimétricamente en dos regiones distintas: una zona de adhesión y otra de deslizamiento con formas elípticas cada una. Además, se consideró que el eje axial de la elipse de la zona de adhesión coincidía con el eje axial de la elipse de contacto, y que ambas elipses se tocaban en su punto más extremo, tal y como se muestra en la figura 24.

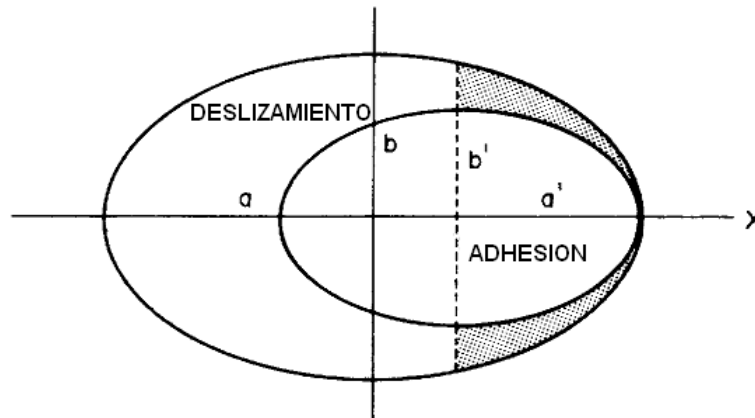


Figura 24. Elipse de adhesión y deslizamiento según Johnson & Vermeulen

La fuerza tangencial  $\mathbf{F}(F_x, F_y)$  obtenida según esta teoría es:

$$\frac{F}{\mu \cdot N} = \begin{cases} \frac{1}{\tau} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{1}{3} \cdot \tau \right)^3 - 1 \right] \cdot (\xi \cdot i + \eta \cdot j) & \text{para } |\tau| \leq 3 \\ -\frac{1}{\tau} \cdot (\xi \cdot i + \eta \cdot j) & \text{para } |\tau| \geq 3 \end{cases}$$





donde:

$$\xi = \text{pseudo-deslizamiento longitudinal normalizado} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot G}{\mu \cdot N \cdot \phi} \cdot \xi_x$$

$$\eta = \text{pseudo-deslizamiento lateral normalizado} = \frac{\pi \cdot a \cdot b \cdot G}{\mu \cdot N \cdot \psi_1} \cdot \xi_y$$

$$\tau = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$$

y donde "a" es el semieje de la elipse en la dirección longitudinal y "b" es el semieje en la dirección transversal.

Debido a que la teoría de Johnson & Vermeulen no tiene en cuenta el efecto del giro, su uso está restringido al caso de pseudo-deslizamientos longitudinal y transversal puros, cuando no se tiene giro.

### 2.2.4.2. TEORÍA LINEAL DE KALKER

En 1967 Kalker [15] desarrolló una teoría en la que consideraba que la relación entre las fuerzas de contacto tangenciales y los pseudo-deslizamientos era lineal.

Las relaciones lineales que Kalker establece para las fuerzas de contacto son:

$$F_x = -f_{33} \cdot \xi_x$$

$$F_y = -f_{11} \cdot \xi_y - f_{12} \cdot \psi$$

$$M_z = f_{12} \cdot \xi_y - f_{22} \cdot \psi$$

donde:

$F_x$  es la fuerza debida al pseudo-deslizamiento longitudinal.

$F_y$  es la fuerza debida al pseudo-deslizamiento lateral.

$M_z$  es el momento debido al pseudo-deslizamiento de giro.



$\xi_x$  es el pseudo-deslizamiento longitudinal.

$\xi_y$  es el pseudo-deslizamiento lateral.

$\psi$  es el pseudo-deslizamiento de giro.

$f_{11}$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{22}$  y  $f_{33}$  son los coeficientes de pseudo-deslizamiento definidos por Kalker como:

$$f_{11} = (a \cdot b) \cdot G \cdot C_{22}$$

$$f_{12} = (a \cdot b)^{3/2} \cdot G \cdot C_{23}$$

$$f_{22} = (a \cdot b)^2 \cdot G \cdot C_{33}$$

$$f_{33} = (a \cdot b) \cdot G \cdot C_{11}$$

tal que:

$G$  es el módulo de rigidez combinado para los materiales de la rueda y el carril:

$$G = \frac{2 \cdot G_w \cdot G_R}{G_w + G_R}$$

$C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$  y  $C_{33}$  son los coeficientes de deslizamiento y de giro cuyos valores están tabulados [16] y dependen únicamente del módulo de rigidez ( $G$ ) y del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) combinados para los materiales de la rueda y el carril:

$$\nu = \frac{G \cdot (G_w \cdot \nu_R + G_R \cdot \nu_w)}{2 \cdot G_w \cdot G_R}$$

$G_w$  y  $G_R$  son los módulos de rigidez de los materiales de la rueda y el carril respectivamente.

$\nu_w$  y  $\nu_R$  son los coeficientes de Poisson de los materiales de la rueda y el carril respectivamente.

La teoría lineal de Kalker sólo es válida cuando los pseudo-deslizamientos longitudinal, lateral y de giro son muy pequeños. Cuando esto ocurre, la zona de



deslizamiento dentro de la zona de contacto es muy pequeña y se puede suponer que el área de adhesión cubre toda la zona de contacto.

Para considerar el caso de pseudo-deslizamientos grandes, Kalker [17,18] desarrolló la *Teoría Exacta* y lo implementó en el programa denominado CONTACT. El problema de esta teoría es que requiere mucho coste computacional. Por esta razón, Kalker desarrolló otra teoría, denominada *Teoría Simplificada*, y la implementó en otro programa denominado FASTSIM [19], que es mucho más rápido pero que comete unos errores del 10-15% con respecto al programa CONTACT.

### 2.2.4.3. TEORÍA SIMPLIFICADA DE KALKER

La teoría simplificada de Kalker se puede utilizar en el caso de que se tenga un contacto que se pueda aproximar por el modelo de Hertz y en el que los cuerpos que están en contacto sean casi-idénticos. Esta teoría tiene en cuenta la influencia del pseudo-deslizamiento longitudinal, lateral y de giro.

Debido a que se considera que los cuerpos son casi idénticos, Kalker dividió el problema del contacto rueda-carril en dos:

- El problema normal, que se resuelve empleando la teoría de Hertz.
- El problema tangencial, que se resuelve empleando la teoría simplificada.

Para desarrollar la teoría simplificada, Kalker consideró que la rueda y el carril eran dos cuerpos rígidos. Modelizó la superficie de contacto entre ellos como un conjunto de muelles situados en puntos discretos de las superficies, y supuso que la superficie de desplazamiento era un único punto que dependía sólo de la tracción en su superficie.

Las fuerzas debidas a los pseudo-deslizamientos que son obtenidas con esta teoría son:

$$F_x = -\frac{8 \cdot a^2 \cdot b}{3 \cdot L} \cdot \xi_x$$

$$F_y = -\frac{8 \cdot a^2 \cdot b}{3 \cdot L} \cdot \xi_y - \frac{\pi \cdot a^3 \cdot b}{4 \cdot L} \cdot \psi$$

La teoría lineal de Kalker es un caso particular de la teoría simplificada.



## **2.3. MODELOS PARA PREDECIR FALLO POR FATIGA EN RUEDAS FERROVIARIAS.**

La aparición de fatiga bajo cargas de contacto en servicio o “Rolling Contact Fatigue” (RCF) es debida a la combinación de tensiones que se producen en el contacto de la rueda con el carril debido a las fuerzas tangenciales, las fuerzas verticales y a los microdeslizamientos que se producen en el área de contacto. La mayor parte de estos parámetros no se pueden medir directamente con las técnicas actuales. Sin embargo, los conocimientos en el campo de la dinámica ferroviaria nos dan la oportunidad de predecir con exactitud los valores de estos parámetros para una gran variedad de condiciones diferentes, proporcionando una valiosa correlación entre los muchos factores que influyen en el RCF.

### **2.3.1. MODELOS PARA PREDECIR EL RCF**

El análisis de fatiga bajo cargas de contacto en servicio (RCF) es complicado debido a la variación del campo de tensiones multiaxiales y por la simulación de cargas de compresión. Además, en el caso de ruedas de trenes, la deformación plástica aparecerá al principio y dará como resultado tensiones residuales. Los modelos predictivos, si queremos tener en cuenta tales factores, son bastante complicados desde un punto de vista teórico y requieren un gran coste computacional [Lundén, 1992; Ekberg, 1997] [20][21]. La alternativa es utilizar modelos simplificados, que son menos costosos computacionalmente. Las simplificaciones típicas de estos modelos consisten en la introducción de factores de corrección para compensar estos errores. De esta manera, podemos tener en cuenta efectos dinámicos, tales como la influencia de la velocidad. También podemos realizar medidas simplificadas de la fatiga, como por ejemplo considerar el criterio de tensión máxima Von Mises en condiciones de 2D. Estas simplificaciones pueden generar resultados dudosos cuando varían las condiciones iniciales de carga, velocidad, etc.

Una limitación importante que presentan los modelos de predicción del RCF es que se centran, salvo excepciones, en un mecanismo simple de fatiga. Sin embargo, se ha demostrado que los fallos por fatiga en ruedas de trenes pueden dividirse en al menos tres categorías diferentes [Ekberg, 1999 y 2001] [22] [23]. Estas categorías son:

- Fatiga superficial
- Fatiga subsuperficial



- Fatiga debida a defectos profundos del material

Los fallos por fatiga superficial son consecuencia de deformaciones plásticas severas que se producen en la superficie del material. Estos fallos son relativamente inofensivos, aunque costosos, ya que normalmente se tiene como resultado el desprendimiento de una pequeña parte de material de la banda de rodadura.

Los fallos iniciados subsuperficialmente, por otro lado, pueden tener como resultado el desprendimiento de partes muy grandes de material de la llanta e incluso se pueden producir fallos catastróficos en los que se rompa toda la rueda. Esta fatiga es consecuencia de la presencia de defectos del material.

Las tensiones locales alrededor de los defectos son grandes incluso en el caso de defectos profundos [Kabo, 2000 y 2002] [24][25]. Esto puede causar la formación y propagación de grietas profundas, un fenómeno a veces denotado como “deep shelling” o “shattered rim”. Se estudiará más adelante con más detalle estos diferentes mecanismos de fatiga.

Las características principales que tienen que tener estos modelos de predicción son las siguientes:

- Deben estar basados en principios científicos referentes a la aparición de mecanismos de fatiga.
- Deben ser fácilmente integrables en un sistema dinámico multicuerpo de interacción rueda-carril sin un gran coste computacional.
- Debe ser comprensible y manejable desde un punto de vista ingenieril.

La simplificación de los modelos actuales nos facilita su implementación en códigos dinámicos multicuerpo (MBD) sin apenas incrementar el coste computacional.

### **2.3.2. FATIGA SUPERFICIAL**

#### **2.3.2.1. MECANISMOS DE FATIGA**

La iniciación de las grietas superficiales es el resultado de la histéresis y/o de la fatiga a bajos ciclos de carga (LCF) en la superficie del material. Una vez iniciada una grieta en la capa superficial se propagará en un ángulo poco profundo de la superficie

desviándose primero en una dirección casi radial y después en una dirección de crecimiento circunferencial, tal y como puede verse en la siguiente figura.

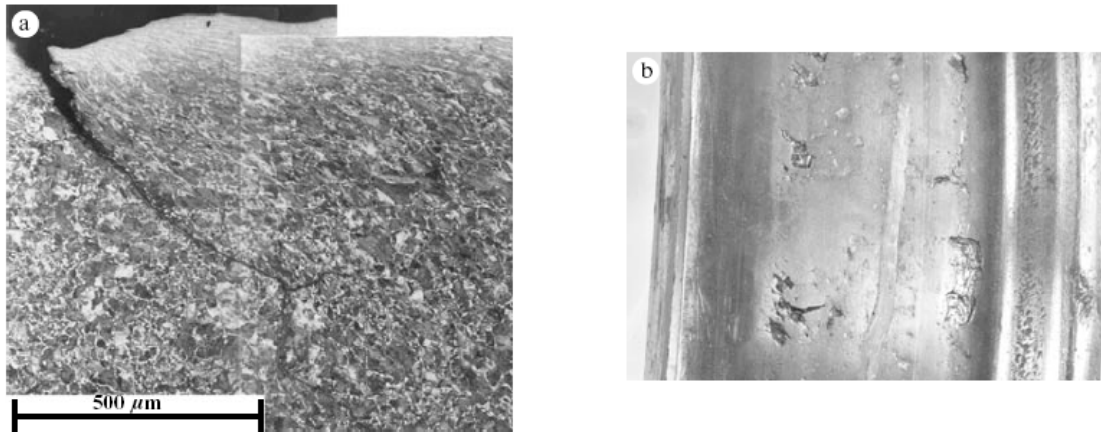


Figura 25. Iniciación de una grieta superficial y superficie final dañada

La dirección final se alcanza a una profundidad de unos pocos milímetros. En las vías, la propagación de las grietas superficiales es favorecida por los lubricantes (grasa, agua, etc) y hay indicaciones de que ocurre lo mismo para las ruedas. Finalmente se producirá la fractura con la propagación de la grieta hacia la superficie, rompiéndose una parte de la banda de rodadura de la rueda.

#### 2.3.2.2. MODELO PREDICTIVO

Un camino rápido, razonable y certero de identificar los niveles de carga correspondientes a la histéresis y a LCF en el contacto de rodadura es el uso de mapas Shakedown o de histéresis. Estos mapas utilizan los siguientes parámetros de entrada:

- Tensión límite en cizalladura pura (torsión),  $k$
- Magnitud de carga vertical,  $F_z$
- Magnitud de carga lateral,  $F_{lat}$
- Semiejes de la elipse del área de contacto, en el contacto Hertziano,  $a$  y  $b$

La magnitud de carga vertical y las dimensiones de la zona de contacto se utilizan para evaluar la presión máxima de contacto Hertziano,  $p_0 = 3F_z / (2\pi ab)$ , la cual podemos dividir por la tensión límite en cizalladura,  $k$ , y obtener así la carga vertical normalizada,  $v$ , utilizada en el mapa de histéresis.

$$v = \frac{\lambda p_0}{k} = \frac{3\lambda F_z}{2\pi abk}$$

Aquí,  $\lambda$  es un factor de carga dependiente de la geometría de contacto, que tomaremos igual a uno para este estudio [Ponter, Hearnly and Johnson] [26].

El segundo parámetro de entrada en el mapa es el coeficiente de fricción utilizado,  $\mu$ . Nosotros lo definiremos como el cociente entre las cargas tangenciales y la carga vertical.

$$\mu = \frac{F_{lat}}{F_z} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z}$$

Donde  $F_x$  y  $F_y$  son las fuerzas longitudinal y lateral respectivamente en el contacto.

La combinación de cargas y la geometría de contacto se definen por un punto de trabajo dado por  $(\mu, v)$  en el mapa Shakedown adimensional, figura 26. La respuesta de un determinado material depende de la región en la que se localice el punto de trabajo (shakedown elástico, flujo superficial, etc.). Debe tenerse en cuenta que el mapa de histéresis no predice un límite de vida a fatiga, sino que indica, por ejemplo, que aparecerá flujo superficial, en cuyo caso también es posible que aparezca una superficie de fatiga. Además, el mapa de histéresis se obtiene suponiendo un deslizamiento puro [Johnson, 1989] [27].

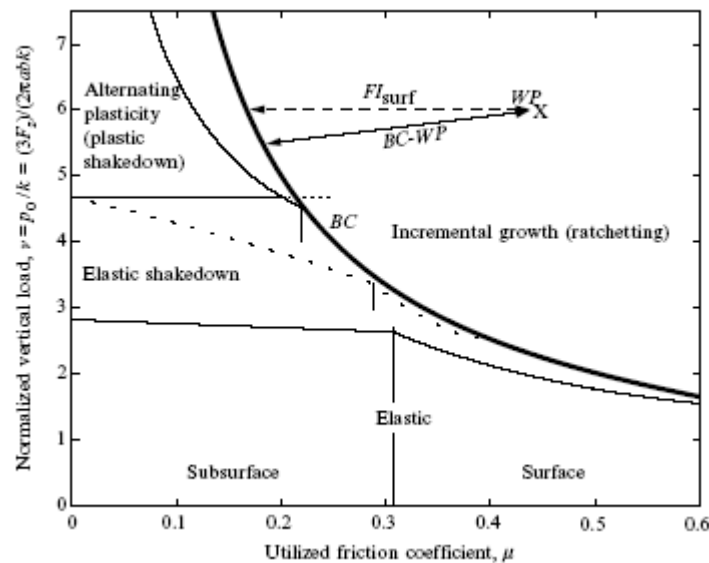


Figura 26. Mapa Shakedown



En este modelo de predicción, empleamos el mapa de histéresis solo para analizar la fatiga superficial. Por tanto, solo será importante la curva límite de flujo superficial, denotada por  $BC$  en la figura 26. La ecuación para esta curva es:

$$v = \frac{1}{\mu}$$

En la figura 26, vemos también que  $X$  es el punto de trabajo y  $BC$  es la curva límite para la plasticidad de la superficie.

### 2.3.2.3. ÍNDICE DE FATIGA SUPERFICIAL

Una medida para cuantificar la posibilidad de aparición de fatiga en la superficie es considerar la distancia más corta entre la curva límite,  $BC$ , y el actual punto de trabajo,  $WP$ . Esta distancia se define positiva si el punto de trabajo está a la derecha de la curva límite, es decir, el flujo superficial aparecerá si el parámetro de fatiga es positivo.

Además podemos simplificar, si consideramos que en el dibujo a escala, la curva límite,  $BC$ , es casi vertical. De este modo, la distancia entre el punto de trabajo y la curva límite difiere muy poco de la proyección horizontal de esta distancia. Esto ocurre para valores altos de  $\mu$  y valores bajos de  $v$ . Sin embargo, aquí el desgaste será parecido al de la superficie del material.

Con estas simplificaciones, y fijándonos en la figura 26, vemos que el índice de fatiga en la superficie,  $FI_{surf}$ , se puede expresar como:

$$FI_{surf} = \mu - \frac{1}{v} = \mu - \frac{2\pi abk}{3F_z}$$

Se considera que hay fatiga en la superficie si:

$$FI_{surf} > 0$$

Debe tenerse en cuenta que el valor de  $k$  en la ecuación de  $FI_{surf}$  es el límite en cizalladura para el material endurecido en servicio. Debido a la extrema deformación por cizalladura del material de la superficie, este límite puede ser del orden de dos veces superior respecto al límite inicial.





### 2.3.3. FATIGA SUBSUPERFICIAL

#### 2.3.3.1. MECANISMOS DE FATIGA

Las grietas subsuperficiales se inician a una profundidad de más de 3mm por debajo de la banda de rodadura de la rueda. Por debajo de unos 10mm, la resistencia a fatiga estará totalmente gobernada por la presencia de inclusiones macroscópicas tal como veremos en el apartado “Fatiga iniciada por defectos profundos”.

El fenómeno al que aquí nos referimos como “Fatiga subsuperficial” es el resultado de la fatiga a altos ciclos de carga (HCF) (Siguiendo la zona elástica Shakedown) causados por la combinación de una alta carga vertical, una mala geometría de contacto (proporcionando una superficie de contacto pequeña) y localmente una baja resistencia a fatiga del material (Debido a lo mejor a inclusiones microscópicas de sulfuro de manganeso). Las características típicas [Ekberg, 1999] [22] de este tipo de fatiga son:

- No hay indicios de inclusiones macroscópicas ni huecos en el punto de iniciación.
- La iniciación de la grieta se produce a una profundidad entre 3-10mm debajo de la banda de rodadura de la rueda.
- La propagación de la grieta tiene lugar con un ángulo hacia el interior hasta una profundidad de unos 20mm.
- La fractura final se orienta hacia la superficie.
- El tamaño de la grieta circunferencial tiene un tamaño de unos 15-100mm de fractura (En causas extremas puede llegar a 250-300mm).

#### 2.3.3.2. MODELO PREDICTIVO

En estudios anteriores [Ekberg, 1997 y 2001] [28] [23] y [Ekberg, 2000] [29] se ha visto que este tipo de fatiga ha sido analizado mediante resultados de simulación numérica empleando el criterio de fatiga multiaxial Dang Van. El criterio de Dang Van nos indica que habrá un fallo por fatiga si se cumple la siguiente desigualdad:

$$\sigma_{EQ} > \sigma_{EQ,e}$$

Donde

$$\sigma_{EQ} = \max_t [\sigma_{EQ}(t)] = \max_t [\tau_a(t) + a_{DV} \sigma_H(t)]$$

Aquí,  $\tau_a(t)$  es la amplitud de la tensión a cizalladura que es función del tiempo, y está definida como:

$$\tau_a(t) = |\tau(t) - \tau_{mid}|$$

Donde  $\tau(t)$  es el vector tensión cizalladura y  $\tau_{mid}$  es el valor medio de la tensión a cizalladura durante un ciclo de tensión.

En la ecuación de la tensión equivalente,  $a_{DV}$  es un parámetro del material y puede obtenerse como:

$$a_{DV} = \frac{3\tau_e}{\sigma_e} - \frac{3}{2}$$

Donde  $\tau_e$  es el límite de fatiga a torsión alternante y  $\sigma_e$  es el límite de fatiga en flexión alternante.

Además,  $\sigma_h(t) = [\sigma_x(t) + \sigma_y(t) + \sigma_z(t)]/3$  es la tensión hidrostática (tensión positiva) y  $\sigma_{EQ,e}$  es el límite de fatiga equivalente, normalmente tomado igual al límite de fatiga en cizalladura pura, es decir,  $\sigma_{EQ,e} = \tau_e$ .

La figura 27 muestra las características habituales de la superficie de fractura de este tipo de casos.

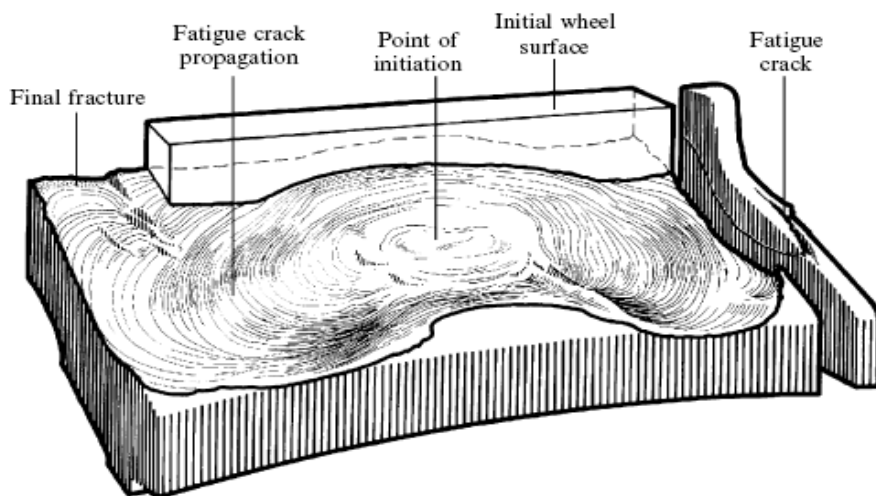


Figura 27. Fallo por fatiga subsuperficial

#### Rodadura pura en el contacto

Suponemos que el contacto rueda-carril se produce en rodadura pura. Si nos fijamos en la figura 28 se muestra la evolución de la tensión hidrostática y de la amplitud de la tensión a cizalladura en un punto de material subsuperficial sujetas a la condición anterior, es decir, sin fricción.

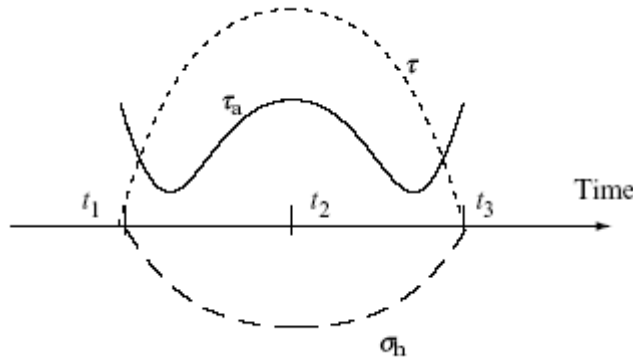


Figura 28. Esquema de la tensión hidrostática y de la tensión a cizalladura

Puede verse en la figura, que las magnitudes mayores de  $\tau_a$  aparecen en los instantes  $t = t_1, t_2$  y  $t_3$ . Debido a que  $\sigma_h(t_2)$  es negativa, el valor mayor de  $\sigma_{EQ}(t)$  se obtiene en los instantes  $t = t_1$  y  $t_3$ , donde  $\sigma_h(t_1) = \sigma_h(t_3) = 0$ . Como resultado de esto [Ekberg, 1996] [30], nos queda que:

$$\sigma_{EQ}(t_1) = \sigma_{EQ}(t_3) = \tau_a(t_1) = \tau_a(t_3)$$

Basándonos en los resultados obtenidos podemos considerar que las tensiones a cizalladura se pueden aproximar de la siguiente manera:

$$\tau_a(t_1) = \tau_a(t_3) \approx \frac{\tau_{\max}}{2}$$

De acuerdo a la teoría Hertziana podemos aproximar la mayor tensión a cizalladura en la subsuperficie como:

$$\tau_{\max} \approx \frac{F_z}{2\pi ab}$$



La combinación de estas ecuaciones nos ofrece una aproximación de la tensión máxima equivalente Dang Van que experimentará un punto material de la rueda de un tren sujeta a la condición de rodadura pura.

$$\sigma_{EQ,PR} \approx \frac{F_z}{4\pi ab}$$

Aquí el subíndice PR indica rodadura pura.

### Influencia de las tensiones residuales.

Las tensiones residuales no influirán en la magnitud de  $\tau_a(t)$  siempre y cuando la tensión residual sea estática, lo que causa que  $\tau(t)$  y  $\tau_{mid}$  estén igualmente influenciados. Sin embargo, la tensión hidrostática si estará incrementada en un factor  $\sigma_{h,res}$  donde  $\sigma_{h,res} = (\sigma_{x,res} + \sigma_{y,res} + \sigma_{z,res})/3$  es la parte hidrostática de la tensión residual (tensión positiva).

El resultado aproximado de la tensión equivalente para la condición de rodadura pura y con tensión residual es:

$$\sigma_{EQ} = \sigma_{EQ,PR} + a_{DV} \sigma_{h,res}$$

Aquí,  $\sigma_{EQ,PR}$  es la tensión equivalente de rodadura pura en ausencia de tensión residual. Esta corrección de tener en cuenta la tensión residual no es una aproximación, si no que proviene directamente de la definición de  $\tau_a(t)$  en el criterio de Dang Van.

Para calcular esta tensión residual nos referimos a la Norma UNE-EN-13262 de Marzo de 2005 sobre aplicaciones ferroviarias, que trata más concretamente sobre requisitos de las ruedas, ejes montados y bogies.

En el apartado 3.5 de esta Norma, titulado Tensiones residuales, se nos indica los límites de tensión residual máxima y mínima entre los que tiene que estar comprendida la rueda antes de entrar en servicio.

El subapartado 3.5.1 (Generalidades) de esta norma nos dice que el tratamiento térmico de la rueda debe incluir un campo de tensiones residuales circunferenciales de compresión en el interior de la llanta.

El subapartado 3.5.2 (Valores a obtener) nos determina los límites de tensiones para cada profundidad. El texto dice que el nivel de tensiones circunferenciales a compresión medidas cerca de la superficie de la banda de rodadura debe estar comprendido entre  $80\text{N/mm}^2$  y  $150\text{N/mm}^2$ . Estas tensiones deben ser igual a cero a una profundidad entre 35mm y 50mm. La distribución de tensiones se muestra en la siguiente figura bajo la línea de contacto de rodadura.

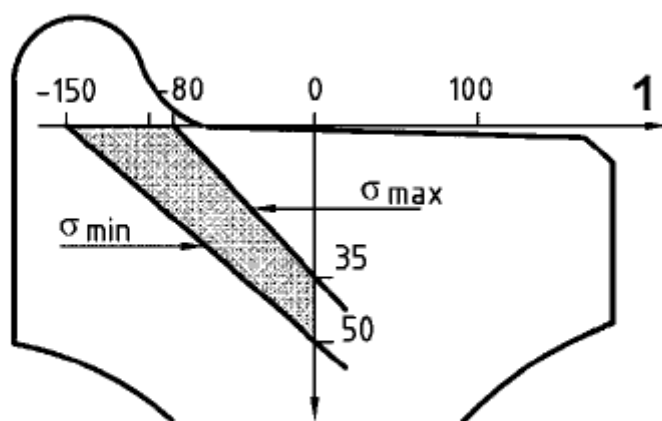


Figura 29. Rango de variación de los valores de tensión

En este caso, como se está en el cálculo de la tensión subsuperficial se está hablando de profundidades entre 3mm y 10mm, lo que supone una tensión residual aproximadamente entre  $80$  y  $120\text{N/mm}^2$ . En este cálculo se va a emplear un valor de  $100\text{N/mm}^2$  considerando una media entre la profundidad y los valores máximos y mínimos.

#### **Influencia de la carga lateral.**

Cuando aparece carga lateral en la zona de contacto durante la rodadura, la tensión equivalente se incrementará moderadamente a medida que esta carga lateral vaya aumentando. La localización de la tensión equivalente máxima tendrá lugar a unos pocos milímetros bajo la superficie. Para coeficientes de rozamiento por encima de un valor límite, aproximadamente  $\mu = 0.25$ , tal y como vemos en la figura 26, la tensión máxima equivalente pasará a tener lugar en la superficie incrementándose rápidamente. Para tales casos, la fatiga superficial, estudiada anteriormente, será el mecanismo de mayor interés.

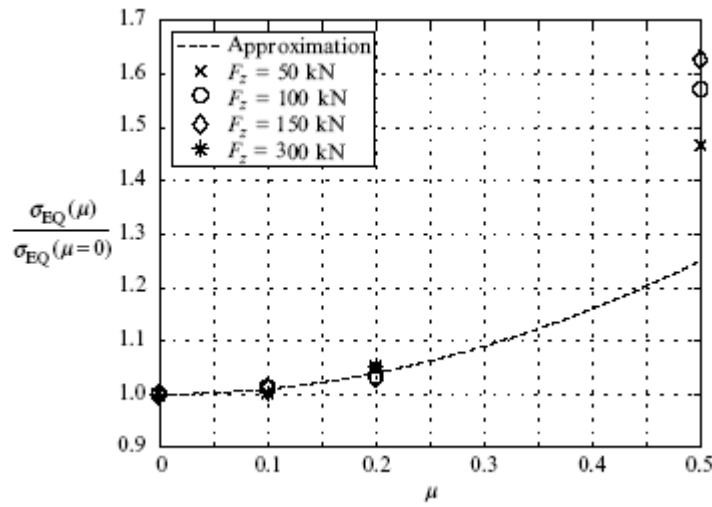


Figura 30. Influencia de la carga lateral sobre las tensiones subsuperficiales para el acero

Así, una aproximación de la influencia de las cargas laterales debe centrarse en casos con una fricción moderada. En estas regiones, una aproximación razonable, como puede ser la dada en la figura 30, es:

$$\sigma_{EQ} \approx \sigma_{EQ,PR} (1 + \mu^2)$$

#### 2.3.3.3. ÍNDICE DE FATIGA SUBSUPERFICIAL

Combinando las tres últimas ecuaciones obtenemos una aproximación de la tensión equivalente subsuperficial bajo las condiciones generales de contacto durante la rodadura. Esta tensión se considera para este modelo como el índice de fatiga,  $FI_{sub}$ , para fatiga subsuperficial.

$$FI_{sub} = \sigma_{EQ} \approx \frac{F_z}{4\pi ab} (1 + \mu^2) + a_{DV} \sigma_{h,res}$$

Esta aproximación de la tensión equivalente Dang Van es notablemente precisa. La evaluación de la tensión equivalente Dang Van se realiza usando un algoritmo de contorno donde las tensiones equivalentes se evalúan para un número determinado de planos de cizalladura.  $a_{DV}$  se calcula según [Dang Van, 1989] [31].



## CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

Tal como se dijo anteriormente, el criterio Dang Van afirma que el daño por fatiga ocurrirá si se cumple la siguiente desigualdad:

$$FI_{sub} > \sigma_{EQ,e}$$

Aquí,  $\sigma_{EQ,e}$  es el límite equivalente de fatiga. Nótese, sin embargo, que en una rueda de tren sujeta a RCF, hay un gran volumen de material sujeto a altas tensiones. Por lo tanto, en el diseño del límite de fatiga hay que tener en cuenta el riesgo que supone un defecto del material en un volumen altamente tensionado. La reducción del límite de fatiga debido a un defecto, puede aproximarse, bajo ciertas suposiciones, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_{EQ,e}} = \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-1/6}$$

Aquí,  $\sigma_w$  es el límite de fatiga del material cuando contiene un defecto de diámetro  $d$ . Además,  $\sigma_{EQ,e}$  es el límite de fatiga en ausencia de defectos grandes y  $d_0$  es el diámetro de un defecto correspondiente a la iniciación de la fatiga en el nivel de tensiones  $\sigma_{EQ,e}$ .

Para simplificar, podemos elegir  $\sigma_{EQ,e}$  como una especie de límite de fatiga suave a torsión. Además  $d_0$  puede aproximarse en torno a los 10-20 $\mu$ m y  $d$  es el defecto de mayor tamaño permitido en el material después de la inspección inicial en la fabricación de la rueda.

Si se requiere,  $FI_{sub}$  se puede normalizar de la siguiente manera:

$$FI_{sub,norm} \equiv \frac{FI_{sub}}{\sigma_w} - 1$$

Donde valores positivos indicarían fatiga de la misma manera que lo hace el índice de fatiga superficial.

### **2.3.4. FATIGA DEBIDA A DEFECTOS PROFUNDOS DEL MATERIAL**

#### **2.3.4.1. MECANISMOS DE FATIGA**

En algunos casos la diferencia entre fatiga subsuperficial y la fatiga debida a defectos profundos es algo incierta. Aquí, la fatiga debida a defectos profundos denota grietas que son el resultado de HCF (o localmente debidas a defectos a LCF) consecuencia de una combinación de altas cargas verticales e inclusiones relativamente grandes de material (del orden de un milímetro). Las características típicas de fatiga debida a defectos profundos son las siguientes:

- La iniciación de la grieta por fatiga tiene lugar a una profundidad de unos 10-25mm por debajo de la banda de rodadura de la rueda.
- Las grietas se inician por defectos o huecos de dimensiones mayores de 1mm.
- La propagación de la grieta se realiza a una profundidad casi constante bajo la banda de rodadura de la rueda (correspondiente a la profundidad inicial) antes de que ocurra la fractura.
- El fallo final en el resultado de la ramificación del crecimiento circunferencial de la grieta.
- El tamaño de la grieta circunferencial en el fallo es de 25-135mm

La morfología de un fallo por fatiga debida a defectos profundos (algunas veces denominado como “deep spalling” o fallo “shattered rim”) puede verse en la figura 31.

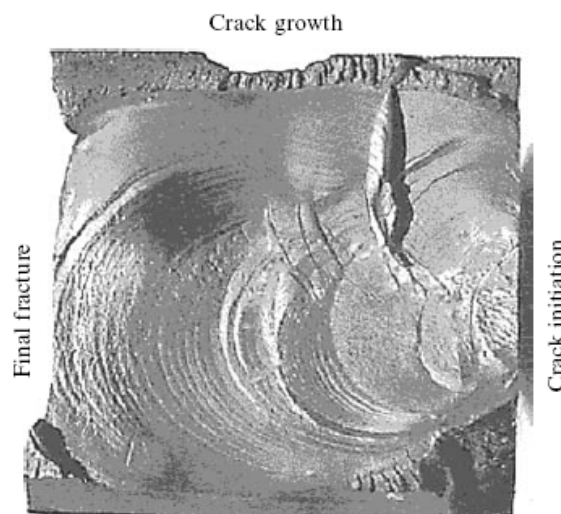


Figura 31. Morfología de un fallo por fatiga debido a defectos profundos





### 2.3.4.2. MODELO PREDICTIVO E ÍNDICE DE FATIGA

Se ha demostrado que el fallo por fatiga en un defecto no está apenas influenciado por la geometría de contacto cuando la magnitud de carga vertical es moderada. Consecuentemente, la influencia de la carga y de la geometría en el modelo de fallo puede aproximarse por la magnitud de carga vertical,  $F_z$ . Esto motiva la adopción de la magnitud de carga vertical como un índice de fatiga para esta fatiga debida a defectos profundos, es decir:

$$FI_{def} \equiv F_z$$

Este índice se puede utilizar para comparar el impacto relativo de diferentes configuraciones tren-carril asumiendo el mismo material para la rueda. Para una evaluación cuantitativa, la fatiga tiene lugar cuando se cumple la siguiente inecuación:

$$FI_{def} > F_{th}(z, d, H, \dots)$$

Actualmente están en marcha intensas investigaciones para cuantificar la magnitud límite  $F_{th}$ . Se sabe que  $F_{th}$  es función de la profundidad de los defectos bajo la banda de rodadura de la rueda,  $z$ , del tamaño del defecto,  $d$ , y de la carga histórica,  $H$ . También parece que  $F_{th}$  depende de la forma y de la composición metalúrgica del defecto.

Finalmente, debe notarse que a menudo los defectos aparecen en grupos. Para estos casos, se ha visto que los defectos interactúan entre si y causan una mayor disminución de  $F_{th}$  comparado con la que nos daría un defecto individual.



## **CAPÍTULO 2**

### **ESTADO DEL ARTE**



## **CAPÍTULO 3**

# **MATERIAL RODANTE EN** **VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

El modo de desplazamiento que se utiliza en la mayoría de los casos en el ferrocarril, es el de la rueda enteriza de acero rodando sobre un carril igualmente de acero, a excepción de reducidos casos en los que se utiliza para su desplazamiento ruedas dotadas de neumáticos o fenómenos de electromagnetismo.

La misión de las ruedas de tren es la de sustentar, guiar, transmitir al carril los esfuerzos, lograr circular en curvas y frenar. Cada una de estas funciones induce esfuerzos mecánicos y térmicos en las ruedas.

Los Estados demandan cada vez más el uso de trenes de alta velocidad. Este tipo de trenes están sometidos a mayores cargas, lo que unido a que en el pasado se han producido algunos accidentes, conduce a la exigencia de unas inspecciones más



## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

rigurosas y menores intervalos de inspección para los componentes críticos, entre los que se encuentran las ruedas. La seguridad en los trenes es primordial, siendo en el caso de alta velocidad, crítica. La aparición de fisuras en las ruedas puede afectar de forma considerable a la seguridad, ya que estas pueden causar un descarrilamiento del tren.

Para evitar los posibles daños que puede acarrear un descarrilamiento, como son pérdidas humanas, pérdidas económicas, problemas medioambientales y miedo en los viajeros y transportistas, se hace necesaria la inspección periódica del estado de las ruedas, tanto de su geometría, como de la aparición de fisuras o defectos en el material.

Se deben tener en cuenta el material de las ruedas, su grado de limpieza para evitar que las fisuras empiecen a crecer a partir de defectos existentes en dicho material y los métodos de ensayo acorde a los criterios de la mecánica de fractura para ruedas de ferrocarril.

## **3.2. MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

### **3.2.1. FUNCIONES PRINCIPALES DEL ÓRGANO DE RODADURA Y TERMINOLOGÍA**

La diferencia principal entre un vehículo ferroviario y otros tipos de transporte rodado es la orientación proporcionada por la vía. La superficie de los carriles no solo soportan las ruedas, si no también las guían en dirección lateral. Los carriles y los cruces cambian la dirección de rodadura de las ruedas y entonces determinan la dirección del viaje para los vehículos ferroviarios.

El órgano de rodadura es el sistema que proporciona un movimiento seguro del vehículo a lo largo de la vía. Incluye componentes tales como ejes montados con cajas de grasa, la suspensión elástica, los frenos, órganos de tracción, y los dispositivos para la transmisión de las fuerzas de tracción y frenado al cuerpo del vehículo. Sus funciones principales son:

- Transmisión e igualación de la carga vertical desde las ruedas del vehículo a las vías



## **CAPÍTULO 3**

# **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

- Guía del vehículo a lo largo de la vía
- Control de las fuerzas dinámicas debido al movimiento sobre las irregularidades de la vía, en curvas, cruces y después de cruces entre coches
- Amortiguamiento eficiente de las oscilaciones
- Aplicación de las fuerzas de tracción y frenado

En vehículos sin bogies la suspensión, frenos, y equipamiento de tracción se montan en la estructura del cuerpo del vehículo. Las fuerzas de tracción y frenado son transmitidas a través de barras de tracción o cajas de grasa guía. Vehículos convencionales de dos ejes generarán mayores fuerzas en curvas cerradas que el vehículo equivalente con bogies, estando por tanto su longitud limitada.

El órgano de rodadura montado en una estructura independiente que puede girar en relativo al cuerpo del vehículo se conoce como bogie. El número de ejes montados que unen clasifica los bogies. El tipo más común es el bogie de dos ejes, pero bogies de tres y cuatro ejes se encuentran también, a menudo en locomotoras.

En el pasado, los bogies simplemente permitían al órgano de rodadura girar en un plano horizontal relativo al cuerpo del vehículo permitiendo de esta manera a los ejes montados tener pequeños ángulos de ataque en curvas. En los bogies modernos, la estructura del bogie transmite todas las fuerzas, longitudinal, lateral, y vertical entre el cuerpo del coche y los ejes montados. La estructura también soporta el equipamiento de frenado, los órganos de tracción, suspensión y amortiguación. También puede alojar los dispositivos de inclinación, dispositivos de lubricación para el contacto rueda-carril y mecanismos para controlar el posicionamiento radial de ejes montados en curvas. Los vehículos de bogies son normalmente más pesados que los vehículos de dos ejes. Sin embargo, el diseño de vehículos ferroviarios con bogies es a menudo más simple que los vehículos de dos ejes, proporcionando éstos mayor fiabilidad y un mantenimiento mejor.

### **3.2.2. COMPONENTES DEL BOGIE**

#### **3.2.2.1. EJES MONTADOS**

Un eje montado comprende dos ruedas conectadas de forma rígida por un eje común. El eje montado está soportado por rodamientos montados en la caja de grasa. El eje montado proporciona:



## **CAPÍTULO 3**

# **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

- La distancia necesaria entre el vehículo y la vía
- La orientación que determina el movimiento dentro del ancho del carril, incluyendo curvas y cruces
- Los medios de transmisión de las fuerzas de frenados y tracción a los carriles para acelerar y frenar el vehículo

El diseño del eje montado depende de:

- El tipo de vehículo (tracción o arrastrado)
- El tipo de sistema de frenado usado (zapatas de freno, freno de disco en el eje, o freno de disco en la rueda)
- La construcción del centro de la rueda y la posición de los rodamientos en el eje (interior o exterior)
- La intención de limitar frecuencia de las fuerzas más elevadas mediante el uso de elementos elásticos entre el centro de la rueda y la llanta

Los principales tipos de diseños de ejes montados se muestran en la figura 1. A pesar de la variedad de diseños, todos estos ejes montados tienen dos características comunes: la conexión rígida de las ruedas en el eje y el perfil de la sección de corte de la superficie de rodadura de la rueda, llamada perfil de la rueda.

En las curvas, el carril exterior de la vía tiene un radio mayor que el carril interior. Esto implica que una rueda cilíndrica tiene que rodar más rápido en el carril exterior que en el interior. Como el movimiento de rotación de las ruedas por unidad de tiempo es el mismo tanto para la rueda exterior como para la interior, tal movimiento no puede ocurrir por rodadura pura. Como ambas ruedas realizan distancias de viaje iguales, una de ellas o ambas por tanto deslizará incrementado de esta manera la resistencia a la rodadura y causando desgaste de ruedas y carriles. La solución es mecanizar la superficie de rodadura de las ruedas a un perfil cónico con ángulo de inclinación y variable con el eje del eje montado (figura 2). La posición del punto de contacto cuando el eje montado está en la posición central en los carriles, determina el conocido como “tape-circle”, donde se mide el diámetro de la rueda. En la parte interior de la rueda, el perfil cónico tiene una pestaña la cual previene descarrilamiento y guía el vehículo una vez que las fuerzas de cortadura existentes entre rueda y carril superan la resistencia del contacto rueda-carril.

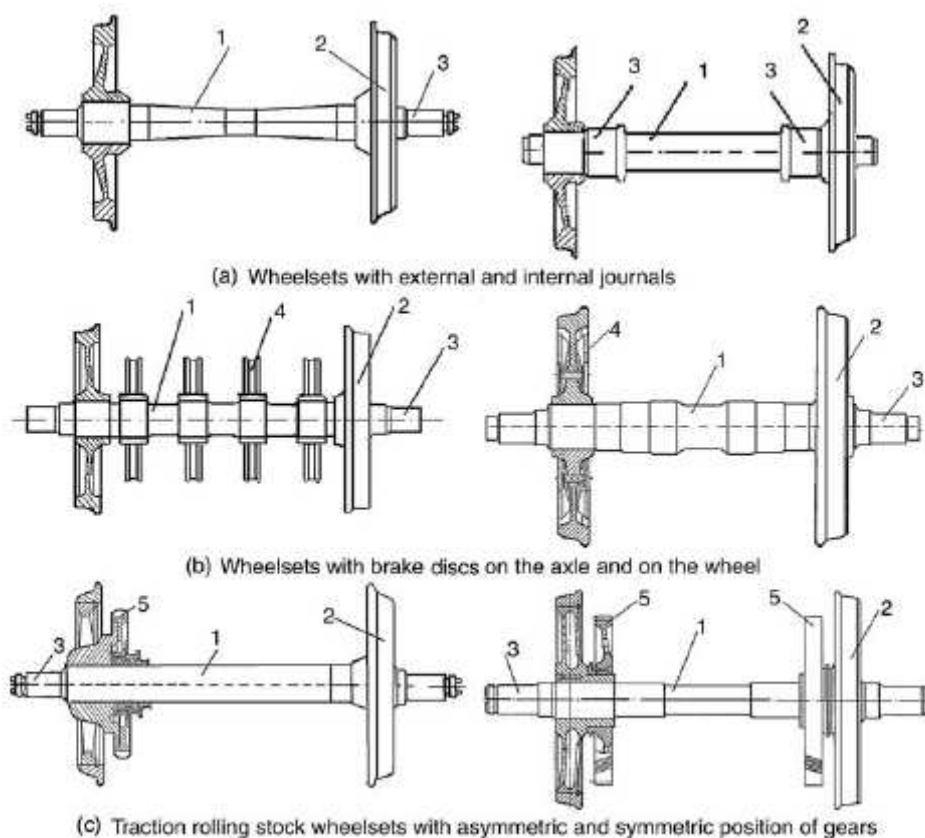


Figura 1. Principales tipos de diseños de eje montado: (a) con rodamientos externos e internos; (b) con discos de freno en el eje y en la rueda; (c) con posición asimétrica y simétrica de engranajes (1, eje; 2, rueda; 3, rodamiento; 4, disco de freno; 5, engranaje de dientes)

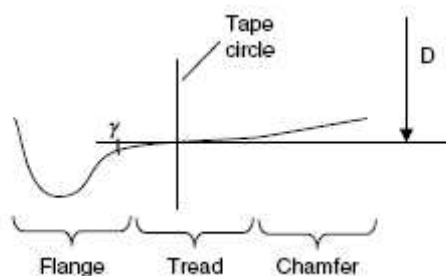


Figura 2. Principales elementos del perfil de la rueda

Un eje montado con perfiles cónicos puede moverse lateralmente en una curva de tal forma que la rueda exterior está rodando en una trayectoria de mayor radio (debido al ángulo de conicidad) que la interior. Se puede ver que para cada radio de la curva solo



## **CAPÍTULO 3**

# **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

existe un valor de conicidad que elimina el deslizamiento. Como los diferentes ferrocarriles van variando los radios de curva con el tiempo, la forma del perfil de la rueda que proporciona mínimo deslizamiento depende de las características de la vía. Las administraciones ferroviarias normalmente especifican los perfiles de rueda permisibles para sus infraestructuras y el grado de desgaste permitido antes de que se requiera un reperfilado.

La figura 3 muestra diversos ejemplos de perfiles de ruedas nuevas. Para entender el comportamiento dinámico de un vehículo ferroviario la conicidad de la intercara es crítica. Conicidad se define como la diferencia de los radios de rodadura de las ruedas para un deslizamiento lateral dado del eje montado.

A pesar de la variedad de perfiles de rueda, tienen un número de características comunes. La anchura del perfil es típicamente 125-135 mm y la altura de la pestaña de vehículos es de 28-30 mm. El ángulo de inclinación de la pestaña está normalmente entre 65 y 70°. Alrededor del “tape-circle” la conicidad es 1:10 o 1:20 para material rodante común. Para material rodante de alta velocidad, la conicidad se reduce a 1:40 o 1:50 para prevenir movimiento de lazo. Algunos perfiles de rueda modernos, particularmente para material rodante de pasajeros, no son cónicos pero se diseñan en cambio desde unas series de radios que aproximan la rueda a un perfil usado. Este diseño pretende dar una forma más estable y prevenir los cambios significativos en conicidad que puede ocurrir en ruedas cónicas desgastadas. Un ejemplo de tal perfil es el perfil de rueda de UK P8.

Para perfiles cuya forma no sea puramente cónica (cualquiera por diseño o por desgaste en servicio), se le aplica el término equivalente de conicidad. Este es el cociente de la diferencia de los radios de rodadura entre el doble del desplazamiento lateral de eje montado:

$$\gamma_{eq} = \frac{\Delta R}{2y}$$

Como la rueda se desgasta, la forma del perfil puede modificarse significativamente dependiendo de un gran número de factores. Estos pueden ser el perfil de curvatura de la ruta, el diseño de la suspensión, el nivel de las fuerzas de tracción y frenado aplicadas, la forma del perfil medio del carril y el régimen de lubricación. El desgaste de la banda de rodadura (figura 4) aumenta la altura de la pestaña y eventualmente causa el contacto con los tornillos existentes en la vía. Si el desgaste de la banda de



rodadura causa que el perfil sea demasiado cóncavo las tensiones existentes en la parte exterior de la rueda y del carril, pueden conducir al conocido como daño de falsa pestaña. El desgaste de la pestaña puede conducir al incremento del ángulo de pestaña y reducción de su espesor.

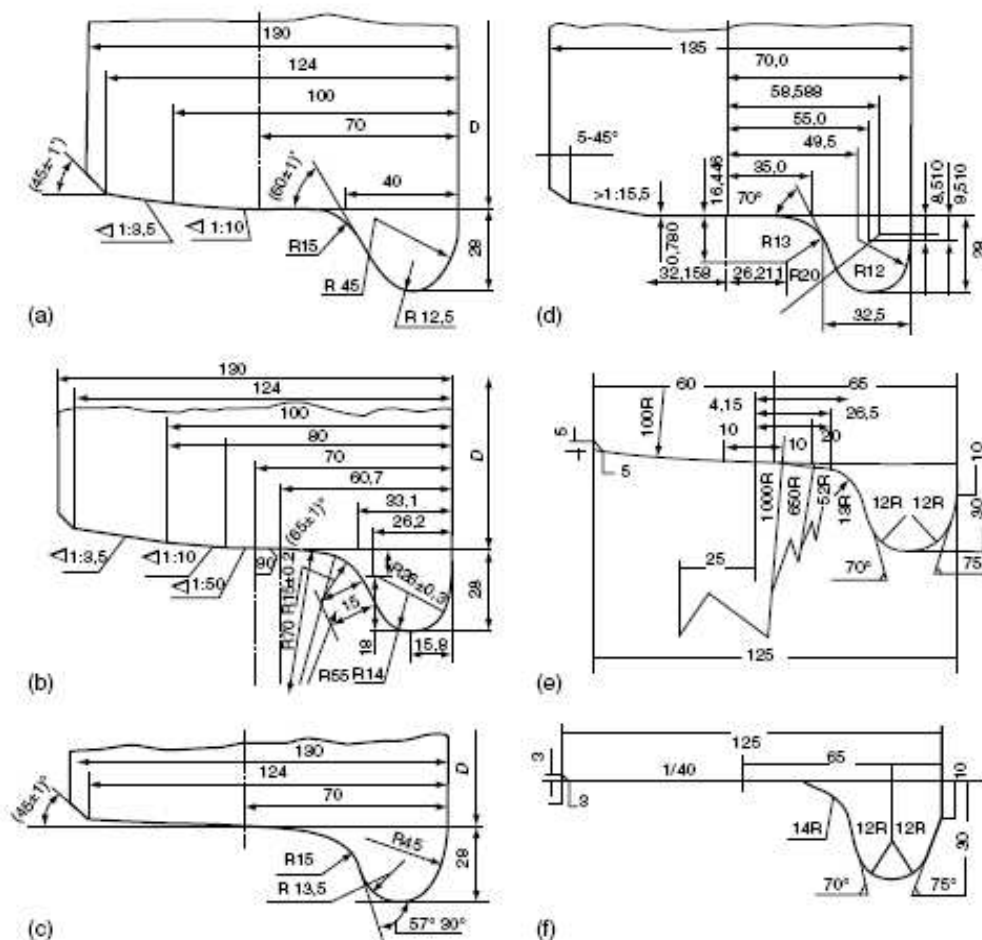


Figura 3 Perfiles comunes de ruedas: (a) para coches de pasajeros y mercancías (Rusia); (b) para coches de alta velocidad (Rusia); (c) para material rodante industrial (Rusia); (d) para coches de pasajeros y mercancías en Europa; (e,f) para trenes de alta velocidad (Japón)

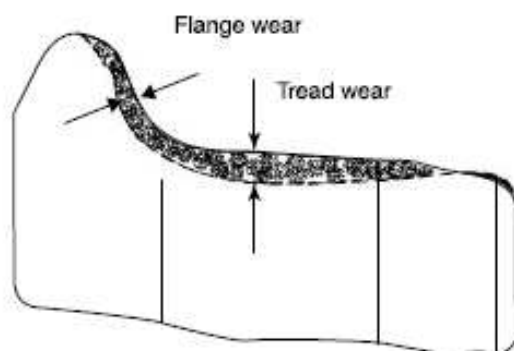


Figura 4 Desgaste de la banda de rodadura y pestaña.



Figura 5 Posibles situaciones de contacto entre la rueda y el carril: (a) contacto en un único punto; (b) contacto en dos puntos; (c) contacto toda la superficie

En condiciones extremas, este tipo de desgaste puede incrementar el riesgo de descarrilamiento en cruces. Los perfiles de rueda generalmente se mecanizan a su forma de diseño por torneados periódicos en un torno de rueda. Esto puede realizarse normalmente sin la necesidad de desmontar el eje montado del vehículo.

Esta claro que las condiciones de contacto variarán considerablemente dependiendo de la forma de los perfiles de rueda y carril. Este contacto puede ser en un único punto, en dos puntos o en toda la superficie como se muestra en la figura 5. El contacto en un punto único se produce entre la parte cónica o en la zona de la banda de rodadura gastada del perfil de la rueda y la esquina redondeada del perfil. En este caso las ruedas se desgastan rápidamente tomando la forma del carril. Con dos puntos de contacto la rueda además toca el carril con su pestaña. En este caso, el contacto rodante tiene dos radios diferentes lo cual causa un deslizamiento intensivo y un desgaste rápido de la pestaña. El contacto de toda la superficie aparece cuando el perfil de la rueda y todo el ancho de la cabeza del carril se desgastan en toda su extensión, siendo los radios en las proximidades de la zona de contacto muy similares.

#### 3.2.2.2. CAJA DE GRASA

La caja de grasa es el dispositivo que permite al eje montado rotar incluyendo el alojamiento del rodamiento y también los soportes para la suspensión primaria sujetando el eje montado al bogie o cuerpo del vehículo. La caja de grasa transmite las fuerzas longitudinales, laterales y verticales desde el eje montado a los otros elementos del bogie. Las cajas de grasa se clasifican de acuerdo a:

- Su posición en el eje dependiendo si los rodamientos están en la parte interior o exterior
- El tipo de rodamiento usado, de rodillos o planos

La forma externa de la caja de grasa se determina por el método de la conexión entre la caja de grasa y el cuerpo del bogie y dirigida a conseguir una distribución de fuerzas uniforme en el rodamiento. La construcción interna de la caja de grasa está determinada por el rodamiento y su método de sellado.

Las cajas de grasa con rodamientos planos (figura 6) consisten en el alojamiento (1), el propio rodamiento (2), el cual normalmente se fabrica de aleaciones con bajo coeficiente de fricción (bronce o metal blanco), la carcasa del rodamiento (3) que transmite las fuerzas desde la caja de grasa al rodamiento, un dispositivo de lubricación (4) que lubrica el eje del rodamiento. Los precintos frontal y trasero (5 y 6) previenen de la suciedad y de cuerpos extraños dentro de la caja de grasa, mientras que el precinto frontal (6) puede retirarse para comprobar el estado del rodamiento y añadir lubricante.

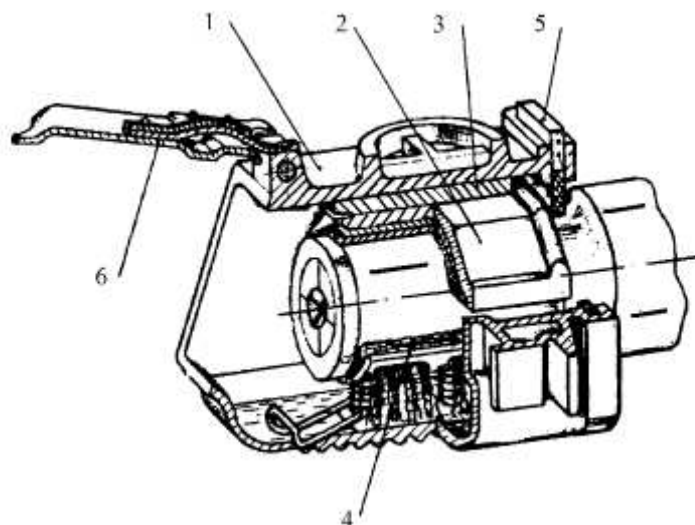


Figura 6. Caja de grasa con rodamientos planos



## **CAPÍTULO 3**

# **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

Las fuerzas verticales y longitudinales se transmiten a través de la superficie interna del rodamiento y las fuerzas laterales por sus caras.

Cajas de grasa con rodamientos planos se están quedando actualmente obsoletas ya que tienen varias desventajas importantes:

- Elevado coeficiente de fricción cuando se parte del reposo
- Poca fiabilidad
- Una labor de mantenimiento muy intensiva
- Contaminación con el medio

Sin embargo, desde el punto de vista del comportamiento dinámico del vehículo, las cajas de grasa con rodamientos planos tienen ciertas características positivas. En los años recientes, se han introducido cajas de grasa con rodamientos planos que no requieren lubricación en ciertos tipos de material rodante, aunque su uso es todavía minoritario.

Cajas de grasa con rodamientos de rodillos (figura 7) se clasifican acorde a:

- El tipo de rodamiento (cilíndrico, cónico, esférico)
- El método de ajuste (ajuste por presión, ajuste por calentamiento)

El principal factor que determina la construcción de la caja de grasa es la forma en que soporta la fuerza axial y distribuye la carga entre los rodillos.

Rodamientos de rodillos cilíndricos tienen una elevada capacidad dinámica en la dirección radial, pero no transmiten fuerzas axiales (figura 7a). La experiencia en la operación de material rodante ferroviario muestra que las caras de los rodillos pueden resistir fuerzas laterales. Sin embargo, para hacer esto satisfactoriamente es necesario regular no sólo el diámetro, si no también la longitud de los rodillos, y la holgura tanto radial como axial.

Los rodamientos cónicos (figura 7b y c) transmiten fuerzas axiales a través de la superficie cilíndrica debido a su inclinación para la rotación del eje. De esta manera es necesario mantener las tolerancias en los diámetros de las bolas y las holguras casi un orden de magnitud más ajustadas que para rodamientos cilíndricos. Además, los rodamientos cónicos tienen elevados coeficientes de fricción comparados con los rodamientos de rodillos y por tanto generan más calor. Esto no solo incrementa el

consumo en la tracción, si no también crea dificultades para los diagnósticos de las unidades de la caja de grasa durante el movimiento.

Recientemente se están usando rodamientos de tipo antifricción. Su característica especial es que el rodamiento no se desmonta por ajuste, si no es instalado como una pieza única.

Rodamientos de bolas no han sido utilizados de manera extensa debido a su elevado coste y bajo capacidad de carga, aunque tienen una ventaja significativa que proviene de su mejor distribución de carga. Los rodamientos de bolas, sin embargo, están a menudo combinados con rodamientos de rodillos en aplicaciones ferroviarias para transmitir las fuerzas axiales.

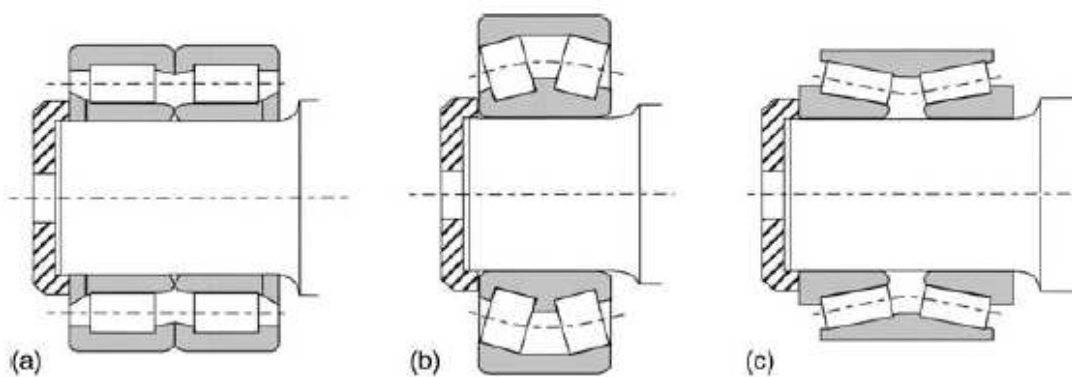


Figura 7. Construcciones de rodamientos de rodillos

El material rodante de alta velocidad a menudo tiene tres rodamientos en la aja de grasa: dos transmitiendo fuerzas radiales y uno (a menudo de bolas) trabajando axialmente (figura 8).

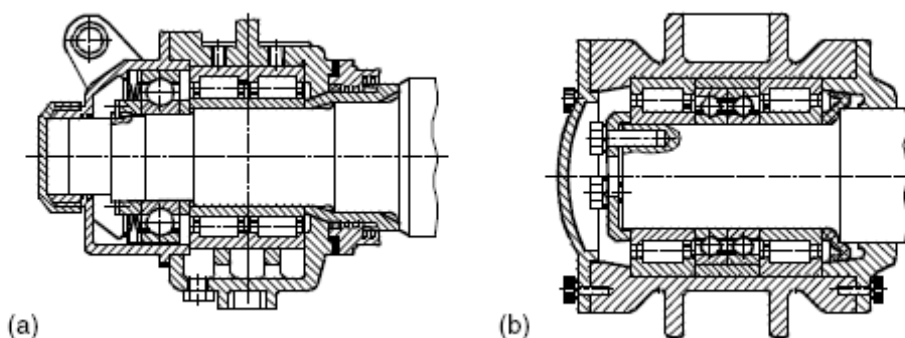


Figura 8. Uso de rodamientos de bolas: (a) rodamientos triples de trenes de alta velocidad en Japón; (b) rodamientos triples de trenes de alta velocidad en Francia



### **3.2.2.3. RUEDAS FERROVIARIAS**

Ruedas y ejes son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Fallos mecánicos o abusos en las dimensiones de diseño pueden causar descarrilamientos. Las ruedas pueden clasificarse como sólidas o enterizas, llanta y tipos ensamblados como se muestra en la figura 9.

Las ruedas sólidas (figura 9a) tienen tres elementos destacados: llanta, velo y el cubo, y principalmente difieren unas de otras en la forma del velo.

Las ruedas de llanta (figura 9b) tienen una llanta ajustada al velo de la rueda que puede ser reemplazado cuando está alcance su límite máximo de reperfilado.

Las ruedas tienen distintos tipos de velo como rectos, cónicos, con forma de S, de radios o corrugados cuando se ven a través de una sección de corte. Un disco recto reduce el peso de la construcción y puede ser formado de manera que el espesor del metal corresponde al nivel de tensión local sometido. Los discos con forma cónico y forma de S sirven para incrementar la flexibilidad de la rueda, reduciendo por tanto las fuerzas de interacción entre las ruedas y los carriles. Los discos corrugados tienen mejor resistencia a las inclinaciones laterales.

La necesidad de reducir las fuerzas de interacción rueda-carril, ha conducido al desarrollo de ruedas elásticas (figura 9c) que incorporan una capa de material con bajo módulo de elasticidad (goma, poliuretano). Esto ayuda a atenuar las fuerzas que actúan con frecuencias elevadas en la interacción rueda-carril.

La mejora de la fiabilidad de los rodamientos despierta interés en las ruedas con rotación independiente proporcionando reducciones significativas en las masas rodantes debido a la eliminación del eje. Con el desacoplamiento de las ruedas, la rotación independiente del eje montado inevitablemente elimina la mayoría de las fuerzas de guiado en el eje montado. Tales ejes montados han encontrado aplicación en cualquier ancho de vía variable proporcionando al material rodante una rápida transición desde un ancho de vía a otro o en transporte urbano por carril donde es necesario un nivel bajo del suelo de los vehículos.



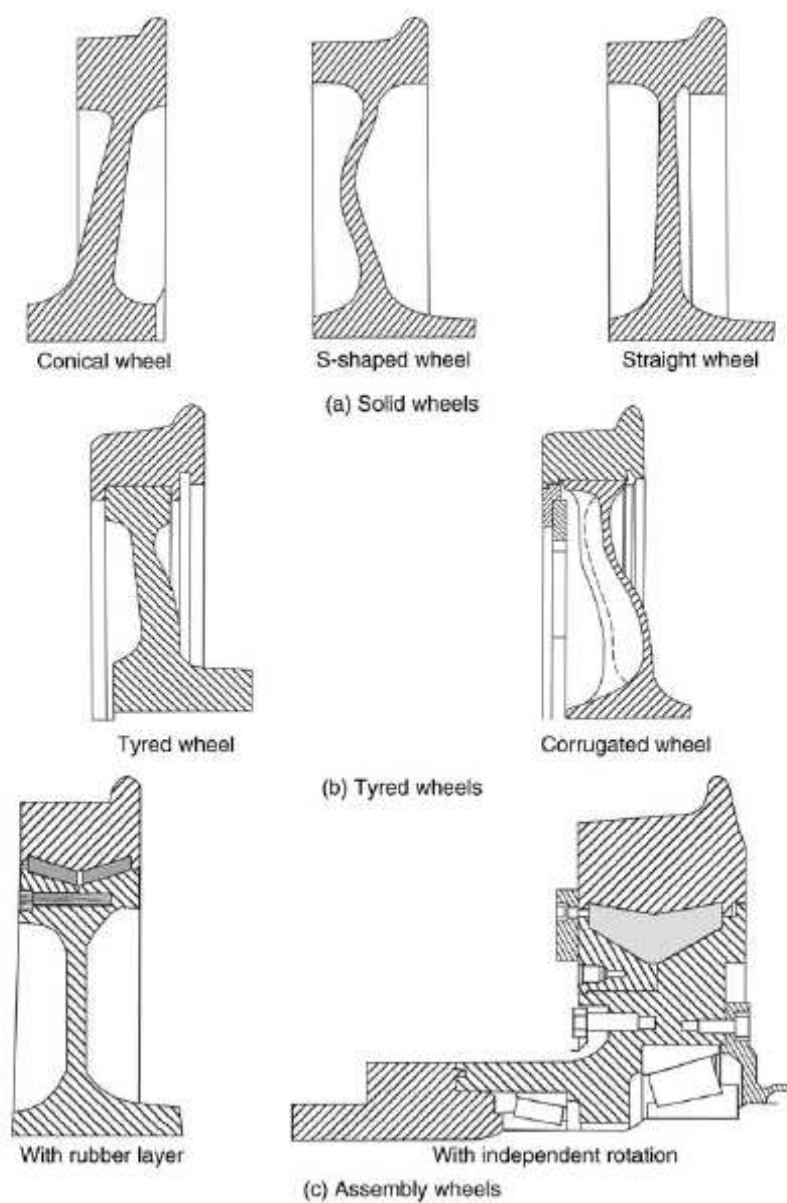


Figura 9. Principales tipos de ruedas ferroviarias

### 3.2.2.3.1. PARTES DE LA RUEDA FERROVIARIA

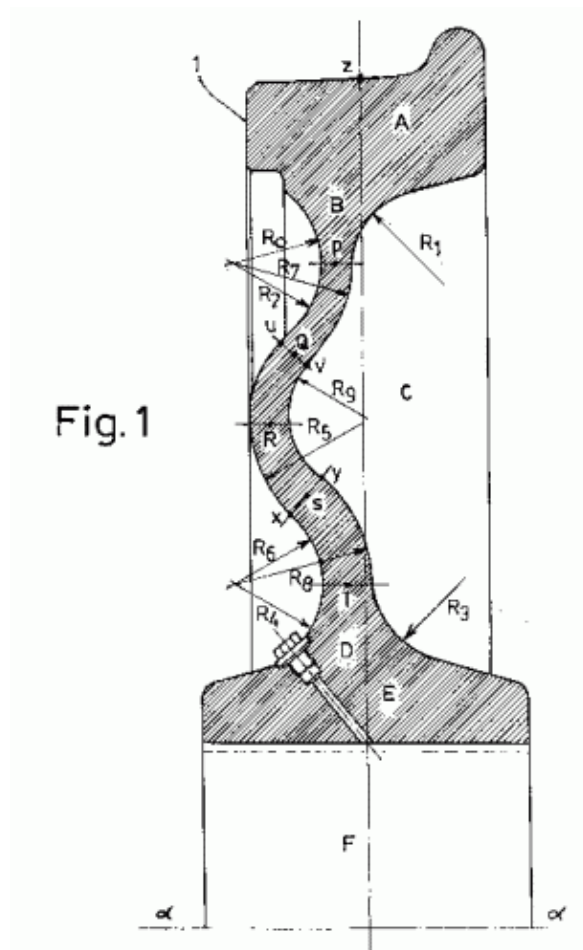


Figura 10. Partes de la rueda enteriza

La rueda de ferrocarril se constituye sobre un sólido de revolución alrededor de un eje  $\{a\}$ - $\{a\}$  y que consta de una llanta (A), un cubo (E) y un velo (C), presentando sobre la llanta un plano mediano teórico (Z) que pasa por el punto de contacto rueda-carril y es perpendicular a dicho eje a-a. La unión del velo (C) a la llanta (A) es mediante una superficie interior de acuerdo y exterior, al igual que la unión del velo (C) al cubo (E). En el velo (C) existe una línea meridiana teórica que va desde el acuerdo (P) del velo (C) con la llanta (A) al acuerdo (T) del velo (C) con el cubo (E), presentando el velo entre el acuerdo del velo (C) con la llanta (A) y el acuerdo del velo (C) con el cubo (E) una primera, una segunda y una tercera curvatura concatenadas con doble punto de inflexión, siendo el plano de la cara exterior (1) de la llanta (A) aproximadamente tangencial a la superficie exterior de la segunda curvatura del velo (C).





### **3.3. FABRICACIÓN DE RUEDAS**

La demanda actual de los mercados de ruedas ferroviarias, busca conseguir unas tolerancias lo más ajustadas como sea posible, así como alargar la vida en servicio de tales ruedas. Para satisfacer esta demanda y ser a la vez capaces de producir en una base lo más económica, se requiere por una parte maquinaria ultra moderna y por otro lado una tecnología sofisticada en la producción de ruedas.

Debido al incremento de la velocidad de los trenes en los últimos años, se debe tener en cuenta el consumo de energía, reduciéndolo todo lo posible, y el incremento en el confort de viaje. Para conseguir estos dos aspectos hay que controlar el peso de las masas rodantes, reduciendo el peso de las ruedas de ferrocarril todo lo posible y mejorando al mismo tiempo su resistencia para soportar las mayores tensiones que existen, como resultado del incremento de las cargas radiales y laterales en las ruedas, así como el aumento de las cargas térmicas.

Los requerimientos necesarios en el caso de las ruedas ferroviarias son:

- uso de materiales modernos y de altas calidades, como aceros desgasificados al vacío
- estructuras especiales en las ruedas
- medidas especiales, para la reducción de tensiones residuales y para el incremento en la tenacidad de fractura manteniendo a la vez buenas propiedades a fatiga.

Las ruedas de acero se pueden fabricar por forja, o por colado. En Europa es más frecuente el uso de ruedas forjadas, mientras que en Estados Unidos es más frecuente el uso de ruedas coladas. La llanta de las ruedas además se suele someter a un tratamiento de templado y revenido, dejando el velo y el cubo en estado normalizado. Ensayos comparativos existentes entre ruedas fundidas y forjadas, muestran claramente la superioridad de las ruedas forjadas considerando la tenacidad de fractura. Las ruedas forjadas ofrecen máxima seguridad haciéndolas apropiadas para el uso en trenes de pasajeros de alta velocidad. El tratamiento térmico de la llanta de la rueda, influye en evitar el desarrollo y progreso de fisuras térmicas, influyendo por otra parte la forma de la rueda en la distribución de tensiones y en su estabilidad dentro del ancho de vía.

En los métodos de producción de ruedas de ferrocarril, no solo hay que tener en cuenta los requerimientos técnicos, sino también hay que conseguir técnicas de

producción económicas, mejorando la utilización del material. La configuración de una línea de producción de ruedas ferroviarias se muestra en la siguiente figura.

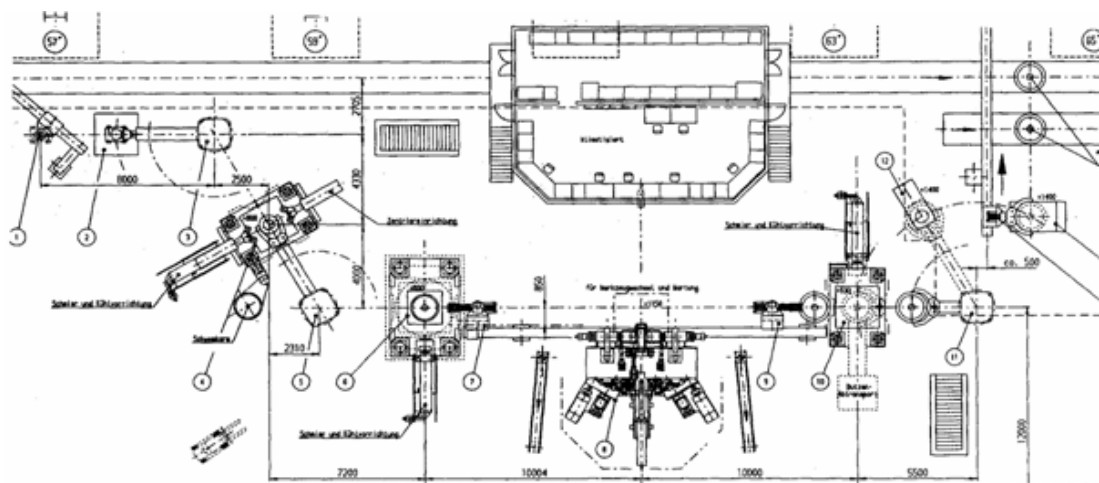


Figura 11. Disposición general de la línea con componentes (NTMK, Rusia)

- |                         |                         |                       |
|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1. Manipulador de carga | 6. Prensa de 90 MN      | 11. Manipulador carga |
| 2. Limpieza             | 7. Manipulador de carga | 12. Prensa de marcado |
| 3. Manipulador de carga | 8. Máquina conformado   | 13. Máquina medida    |
| 4. Prensa de 50 MN      | 9. Manipulador de carga | 14. Manip. descarga   |
| 5. Manipulador de carga | 10. Prensa de 50 MN     |                       |

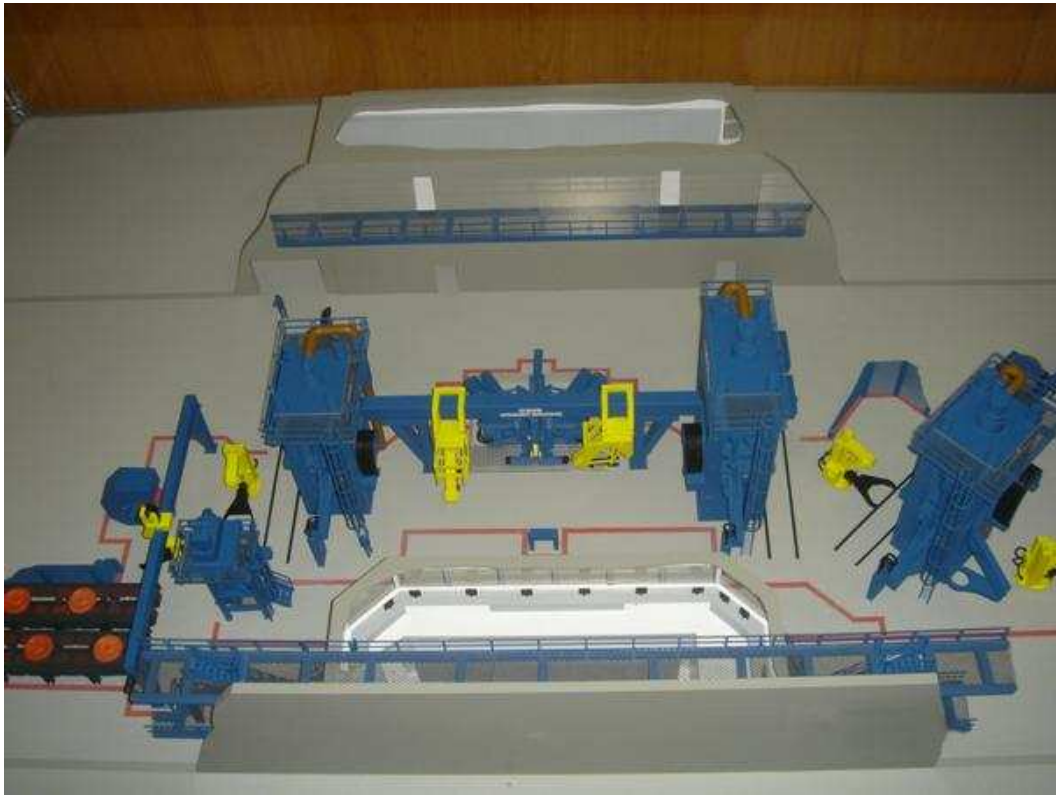


Figura 12. Modelo de línea de producción con componentes (NTMK, Rusia)

#### 3.3.1. FORJA EN BLANCO

El material de partida son bloques cortados a partir de lingotes o barras de material continuo. Estos bloques necesitan un control muy estricto de su peso, la masa de cada bloque es muy importante para la obtención de una rueda que cumpla las especificaciones de diseño. Una vez se cortan los bloques de material se calientan hasta la temperatura de forja en un horno de hogar rotatorio. Los bloques calentados se transportan fuera del horno, se les somete a agua a alta presión para limpiar impurezas, se pesan y se somete a dos operaciones de forja, pasando la rueda a llamarse rueda en blanco.

Después de la limpieza mencionada tras el calentamiento hasta la temperatura de forjado, un manipulador coloca el bloque en la primera prensa hidráulica de 50 MN, aplicando la presión. El bloque se centra con el eje de la herramienta por el dispositivo de centrado que está integrado dentro de la prensa. En esta primera prensa la rueda no llega a tener el perfil final, ya que en este puesto solo se consigue una aproximación del

perfil, como se observa en la figura 13 que corresponde a una imagen del software utilizado por la compañía rusa NTMK, de producción de ruedas ferroviarias.

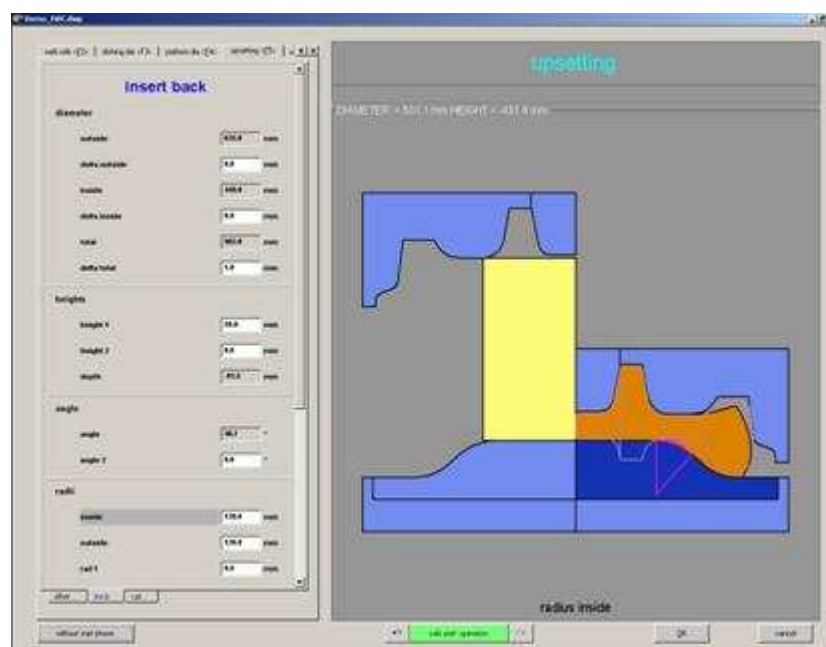


Figura 13. Operación de preforma en blanco (ROLLTECH Wheels)

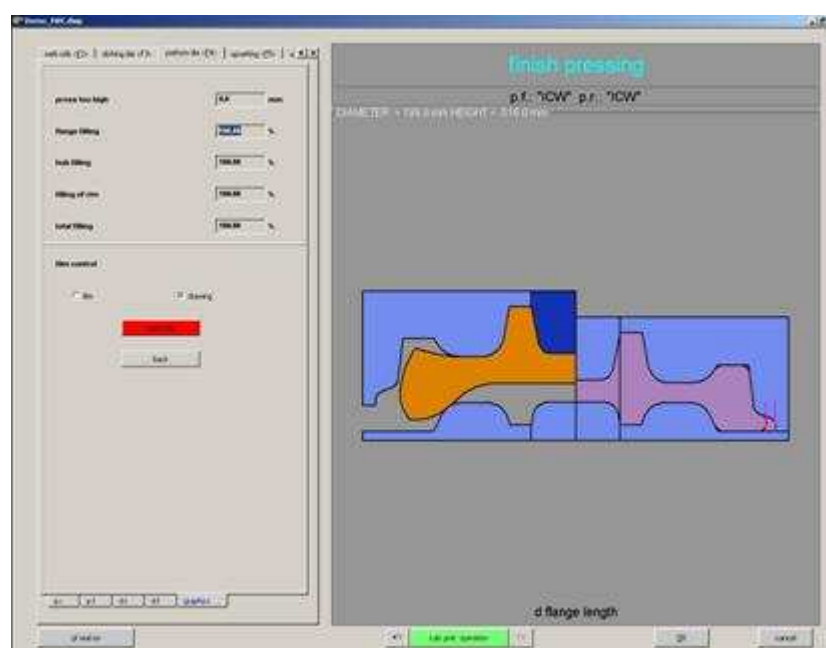


Figura 14. Final de la operación de prensado (ROLLTECH Wheels)



### **CAPÍTULO 3**

## **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

La figura 14 corresponde a la prensa de 90 MN, en la que ya se observa un perfil de la rueda donde se puede distinguir ya la banda de rodadura, la pestaña y el cubo con claridad, constituyendo una preforma, sin llegar todavía a tener el perfil final.

El manipulador de carga es el que se encarga de transportar la rueda en blanco o preforma, de la prensa de 5000 toneladas a la de 9000 toneladas. Una vez se aplica a la rueda la presión ejercida por la prensa de 9000 toneladas, la siguiente operación es la perforación de la parte central de la rueda por medio de un cilindro penetrante. Durante la retirada de dicho cilindro una vez ha hecho la perforación, se debe amarrar la pieza. Simultáneamente a la retirada del eje la prensa, la rueda prensada y taladrada se eleva por medio de un elevador, para poder así ser amarrada por otro manipulador de carga por la parte lateral de la rueda y llevarla hasta el puesto de conformado. La figura 15 corresponde a la salida de la rueda de la prensa de 90 MN, donde se observa la elevación de la rueda para ser amarrada por el siguiente manipulador de carga, por el lateral.



Figura 15. Preforma acabada en la prensa de preforma de 90 MN



Figura 16. Carga de la rueda en blanco en la máquina de perfilado DRAW 1450

Una vez que el manipulador de carga amarra la preforma por los laterales, la introduce en la máquina de conformado de rodillos, siendo la posición de la rueda dentro de esta máquina la vertical, como se observa en la figura 16.

### **3.3.2. CONFORMADO DE LA RUEDA POR RODILLOS**

La máquina de conformado de la rueda tiene un control muy flexible para todos los ajustes de las herramientas. El conformado de la preforma por rodillos se realiza en tres pasos, utilizando los distintos rodillos que forman la máquina. Hay unos rodillos encargados de generar el espesor del velo, otro rodillo encargado del conformado de la banda de rodadura, la pestaña y junto con los rodillos del velo, la parte interna de la llanta, la parte de unión entre velo y llanta, y los rodillos de la llanta conforman la altura de dicha llanta. Todo ello introduciendo la rueda en blanco en la máquina que aparece en la siguiente figura.



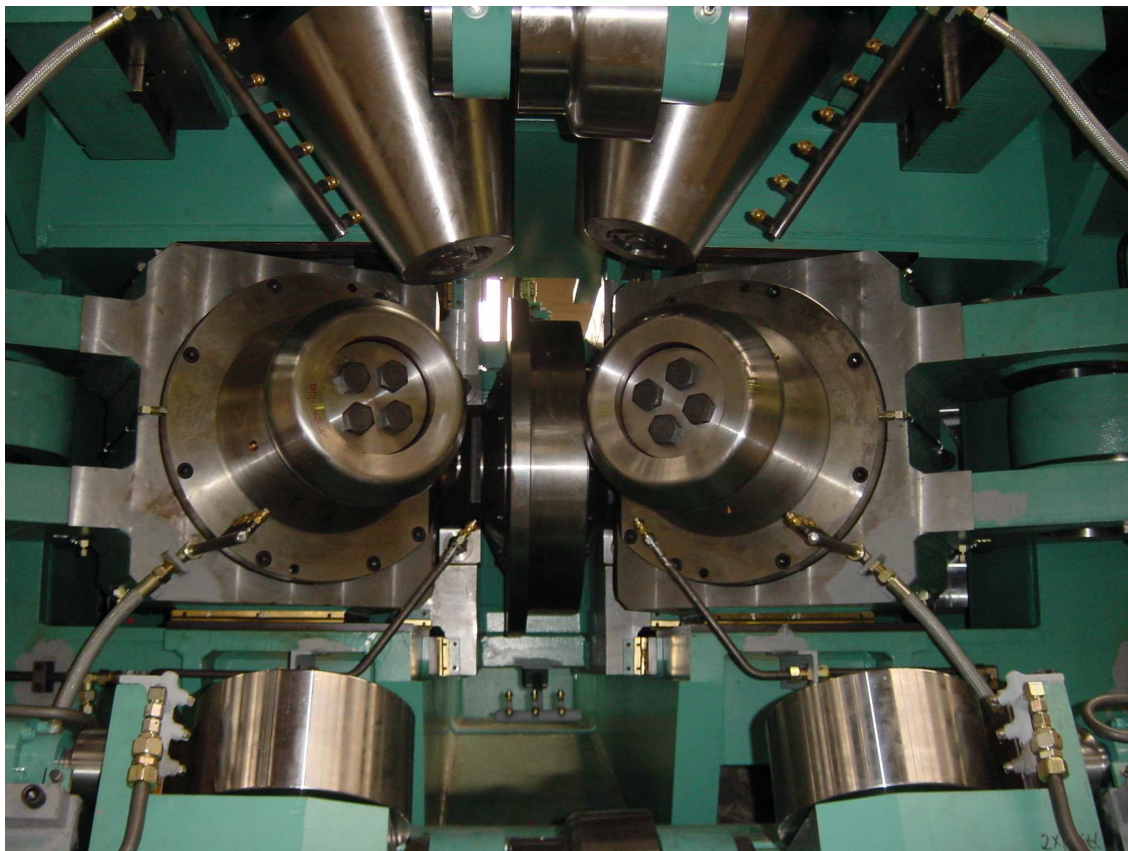


Figura 17. Rodillos que conforman el perfil de rueda requerido

### **3.3.2.1. SECUENCIA DE CONFORMADO**

Después que la rueda en blanco forjada se introduce en la máquina de conformado por rodillos, se sitúa en la posición de conformado por los rodillos de centrado. Una vez la preforma se centra los rodillos encargados de conformar el velo se aproximan y se mueven sobre la rueda, siendo éste el primer paso del proceso. En este paso no se ejerce presión alguna sobre la preforma por tanto, este paso no es todavía ninguna operación de conformado, se puede decir que son movimientos de aproximación.

Es en el segundo paso cuando empiezan a realizarse las operaciones de conformado. Es entonces cuando los rodillos del velo empiezan a ejercer presión, al mismo tiempo que los rodillos laterales que constituyen el tercer paso comienzan a conformar el material, correspondiendo estos rodillos laterales a los rodillos de la llanta. La distancia entre ambos rodillos del velo y por tanto, el espesor respectivo del velo, se controla durante el proceso de conformado dependiendo del crecimiento del diámetro de la

rueda, conformando los rodillos la forma de velo preprogramada. La altura de la llanta se consigue en el tercer paso de conformado por ajuste de los dos rodillos laterales.

La rueda en blanco se conforma hasta su dimensión final, existiendo un estricto control del proceso, con los ajustes de herramientas precisos en cada momento. Por ajustes de los rodillos de presión, el espesor de la rueda va disminuyendo a la vez que va aumentando el diámetro de la misma, como es de esperar.

En este método de conformado por rodillos, el material fluye desde la llanta hacia el velo. Según esta dirección de conformado en la rueda, con este procedimiento se generan tensiones de compresión. Este hecho tiene una influencia favorable en las propiedades del material así como en la exactitud en las medidas de la misma.

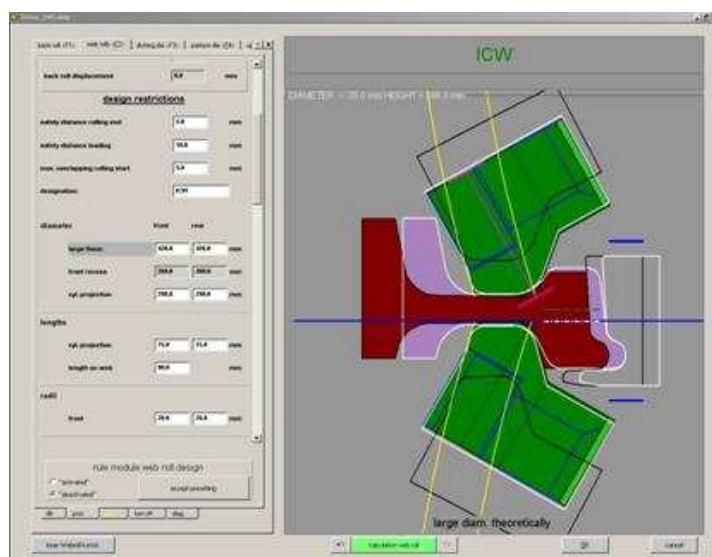


Figura 18. Diseño de los rodillos del velo, observando el material antes y después del proceso de conformado

Como ilustra la figura 18 los rodillos del velo ejercen presión sobre la rueda girando al mismo tiempo, de esta manera el espesor del velo empieza a disminuir dependiendo de la presión ejercida. El movimiento de los rodillos desde la llanta hacia el cubo hace que la rueda aumente su diámetro, extendiéndose el material en dirección al cubo. En la figura 19 se muestra una fotografía de la máquina de conformado por rodillos con la rueda en su interior y los rodillos en funcionamiento.





Figura 19. Operación de conformado en la máquina DRAW 1450

Poco antes de la búsqueda del diámetro programado, se inicia una fase de calibrado automático por reducción de las velocidades ajustadas. Así la rueda se conforma correctamente hasta su tamaño nominal con exactitud en su reproducción.

Las fuerzas de conformado se generan de manera hidráulica y se transmiten a la rueda en blanco, a través de las diferentes herramientas. Mediante distintos dispositivos como válvulas supervisadas por regulación electrónica, se adaptan instantáneamente y con mucha sensibilidad y precisión los movimientos y presiones de operación de las transmisiones a los requerimientos de los procesos de conformado de ruedas.

### **3.3.3. DISPOSITIVO DE MEDIDA LÁSER OD**

Para la detección precisa del diámetro de la rueda en cada momento del proceso de conformado, la máquina que realiza esta función está equipada con un sistema de medida de no contacto. Se trata de un dispositivo de medida láser, que está situado en un alojamiento protector en frente de la máquina.



Durante el proceso de conformado, las dimensiones se transmiten instantáneamente al sistema de control de la máquina y se transforman en señales para el proceso de control. Para una fácil supervisión del proceso de conformado, las dimensiones actuales y nominales de la rueda se reflejan claramente en un CRT en la cabina de control.

### **3.3.4. CONTROL ELECTRÓNICO DE LA MÁQUINA DE CONFORMADO DE LA RUEDA**

La máquina de conformado de la rueda está equipada con medidas digitales de ejes absolutos y representación numérica de las dimensiones relevantes de la rueda. Dicho proceso arranca automáticamente por un CNC.

Los dispositivos para el control de posición para el ajuste de los rodillos así como la presión de los rodillos, se controlan teniendo en cuenta la velocidad de los rodillos y de la rueda en cada momento. Durante este proceso, las fuerzas generadas y el par motor son monitorizados. Si se alcanza uno de los límites de capacidad de la máquina, automáticamente se toman las medidas oportunas para que la máquina esté trabajando dentro del rango permitido.

El software de control es un paquete software con tecnología orientada, permitiendo un arranque automático y un proceso de conformado controlado por ordenador. Así, en conexión con las posiciones de los lazos de control, se revelan los siguientes criterios esenciales por todos los controles:

- El conformado de alta precisión de las ruedas se hace utilizando la capacidad de la máquina de una manera óptima.
- Las secuencias de conformado se generan automáticamente acorde a los requerimientos tecnológicos.
- La programación se efectúa por un operador con sistema de comunicación con teclado y CRT.
- La secuencia de conformado es reproducible.

### **3.3.5. DEFORMACIÓN DEL VELO DE LA RUEDA**

Un manipulador toma todas las ruedas conformadas desde el dispositivo de descarga integrado en la máquina de conformado de ruedas y las traslada hacia la parte inferior

de la matriz de la prensa para la deformación del velo de la rueda. En esta prensa de 50 MN el velo toma la forma establecida en su diseño, tomando forma cónica u ondulada, dependiendo de la forma que tenga la matriz de dicha prensa.



Figura 20. Rueda antes y después de entrar en la prensa de deformación de 50 MN

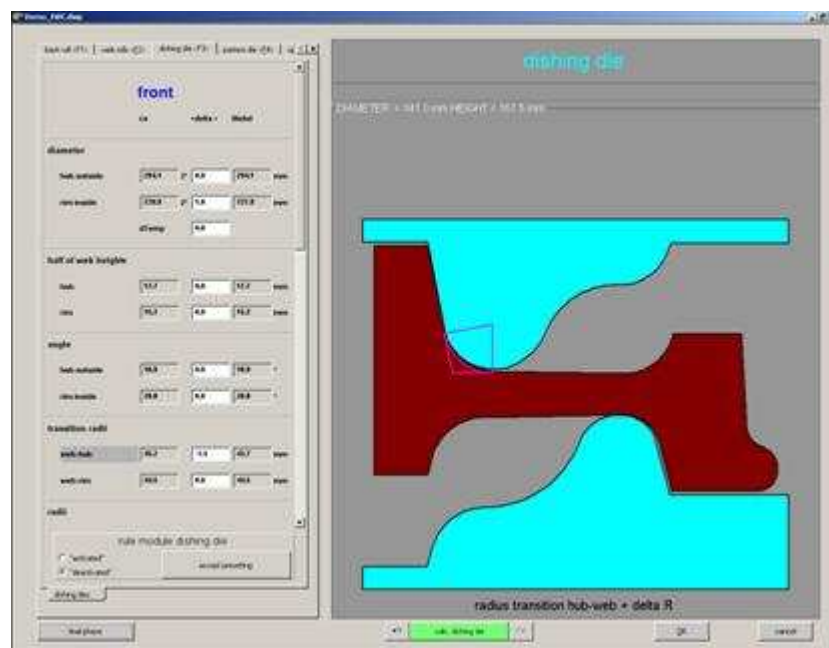


Figura 21. Diseño de herramientas de forma (inicio de operación)

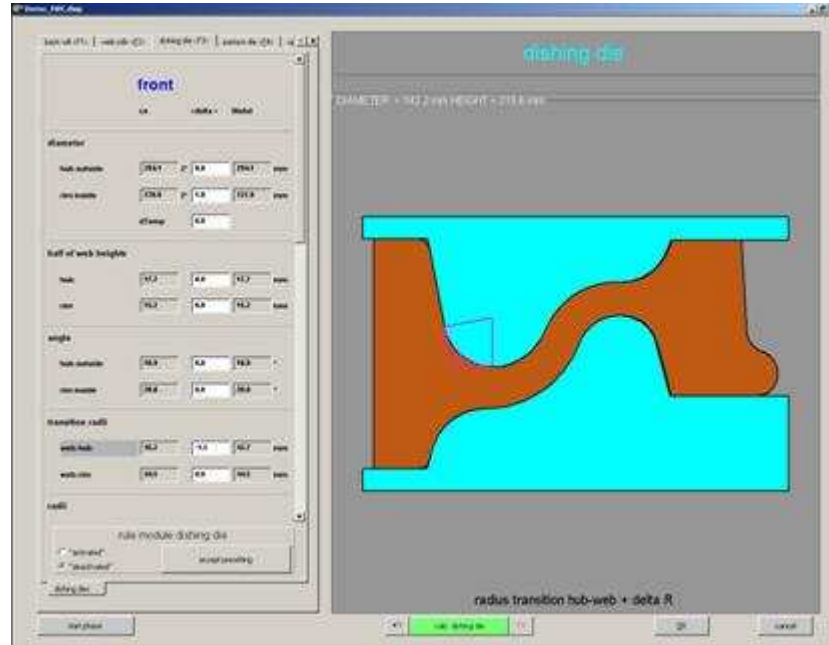


Figura 22. Diseño de herramientas de forma (fin de operación)

Un manipulador se encarga de trasladar la rueda desde la prensa de deformación del velo hasta la máquina de marcado. Después del marcado, las ruedas se transportan a una máquina de medida láser.

### 3.3.6. CONTROL DE LAS DIMENSIONES DE LA RUEDA CON MÁQUINA DE MEDIDA LÁSER 3-D

La máquina de medida es un sistema óptico-electrónico para el control dimensional de las ruedas. Para mostrar la geometría correspondiente de la rueda explorada, la máquina tiene tres cabezales de medida basados en tecnología láser.

Para explorar todas las partes de la rueda, ésta se instala en una mesa rotatoria de 360°. La desviación en la medida de las dimensiones nominales de la rueda se refleja en diferentes colores en una CRT y grabada para un archivo de documentación. Con esta información, los operadores tienen un soporte óptimo para hacer correcciones en la línea de producción y así evitar la producción de ruedas no válidas.

Después del análisis de las medidas, un manipulador coge la rueda para un nuevo transporte hacia las instalaciones de tratamiento térmico y mecanizado.



Figura 23: Máquina automática de medida láser en 3-D



Figura 24: Carga de las ruedas acabadas en una línea de transporte





### **3.3.7. SISTEMA DEL PROCESO DE CONTROL**

Las líneas modernas de forja para la producción de ruedas de ferrocarril forjadas, son sistemas muy flexibles con unos procesos de control muy precisos y consistentes.

Para la más completa automatización de la producción la línea está equipada con unos sistemas modernos de control tales como PLC, controles numéricos adicionales basados en PC para control de ejes de máquinas y de la tecnología del software, un gran ordenador central para mostrar archivos, archivar datos, generar informes, diagnósticos, funciones de planificación y cargar programas de producción. Todas estas líneas trabajan de forma automática usando los métodos más avanzados en forja y en funciones con material rodante.

### **3.3.8. TRATAMIENTO TÉRMICO**

El tratamiento de temple al que se somete la llanta consiste en calentar la rueda en un horno hasta los 827°C para eliminar las tensiones generadas en el forjado. Posteriormente la llanta se enfría con agua pulverizada durante 345 s. Como la primera temperatura está por encima de la temperatura de transformación de fase, se produce la transformación de austenita a perlita durante el enfriamiento. La microestructura perlítica es la que da a la llanta su alta dureza.

En este punto la llanta se ha enfriado y se expande, mientras que el velo y el cubo siguen calientes y relativamente más blandos. La rueda se deja enfriar al aire durante aproximadamente 4 minutos para dejarla posteriormente en un horno a una temperatura de 480 °C durante dos horas, para aliviar algunas de las tensiones generadas durante el enfriamiento de la llanta. Durante este período el velo y el cubo se enfrían por debajo del punto de transformación y se contraen tirando de la llanta, que está más rígida. Este fenómeno induce tensiones residuales de compresión en la llanta. Finalmente la rueda se deja enfriar a temperatura ambiente durante aproximadamente 6 horas.

El resultado es que la parte inferior de la llanta y el velo quedan sometidos a tracción mientras que el resto de la llanta queda a compresión. Este estado de tensiones residuales a compresión impide la formación y crecimiento de fisuras, reduciendo el riesgo de fallo en servicio. El campo de tensiones residuales a compresión se crea hasta una profundidad de alrededor de 40 mm desde la banda de rodadura. A medida que la



## **CAPÍTULO 3**

# **MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS**

rueda se desgasta y es reperfilada, la capa de tensiones a compresión desaparece y la superficie de rodadura se acerca a la capa de tensiones a tracción.

La sensibilidad al agrietamiento térmico aumenta con el aumento del contenido de carbono. La disminución producida en la dureza y la resistencia al desgaste que se produciría al disminuir el porcentaje de carbono deberá ser compensada añadiendo aleantes. Por ello cuando se quieren mejorar las características de resistencia de las ruedas es preferible modificar el tratamiento térmico para lograr un tamaño de grano más fino que aumentar el contenido de carbono en el acero.

En la zona de la llanta hay menores proporciones de ferrita y valores de dureza mayores. Hacia el velo y hacia la pestaña, el incremento en la cantidad de ferrita es responsable de la disminución en los valores de la dureza.

A una profundidad de entre 0 y 0.03 mm de la superficie, la estructura es una mezcla ferrítica carburo que contiene muchas microfisuras orientadas a ángulos entre 0 y 30°, la longitud de estas microfisuras está entre 0.015 y 0.25 mm y su profundidad entre 0.007 y 0.035 mm. El ancho de las fisuras varía entre 0.0002 y 0.0030 mm y la distancia entre las mismas está entre 0.01 y 0.5 mm. La siguiente zona es la de transición al material base, el tamaño de esta zona es de aproximadamente unos 3 mm. Las fisuras de fatiga se propagan principalmente a través de la ferrita.

Para asegurar que no se producen defectos macroscópicos en las ruedas tras su fabricación, a petición de las empresas de fabricación de trenes y mantenimiento de los mismos, todas las ruedas son inspeccionadas por el proveedor mediante la técnica de ultrasonidos, siendo el tamaño mínimo de defecto permitido de 1, 2 ó 3 mm (reflexión igual a la de un agujero de fondo plano de diámetro 1, 2 ó 3 mm).



## CAPÍTULO 3

# MATERIAL RODANTE DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS

Calidad	Composición química (% máximo en peso)											Propiedades mecánicas		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	1+2+3	R <sub>m</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	A(%)	KU (J)
R1	0,48	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	600-720	12-18	15
R2	0,58	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	700-840	9-14	10
R3	0,70	0,50	0,90	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	800-940	7-10	10
R6	0,48	0,40	0,75	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	780-900	15	15
R7	0,52	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	820-940	14	15
R8	0,56	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	860-980	13	15
R9	0,60	0,40	0,80	0,035	0,035	0,30	0,30	0,08	0,30	0,05	0,50	900-1050	12	10

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de las ruedas según la calidad de la misma (ficha UIC 812-3, 1984)

Siendo 1+2+3: Cr + Mo + Ni

En Europa las ruedas se suministran según la ficha UIC 812-3 “Especificación Técnica para el suministro de ruedas monobloque de acero no aleado laminado para el material rodante motor y remolcado”, en 8 posibles calidades (R1 a R8) cuyas características se indican en la tabla 1.

La ficha UIC 812-3 ha estado en vigor hasta el 1 de Agosto del 2006, siendo a partir de esta fecha anulada y sustituida por la Norma UNE-EN 13262 “Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Ruedas. Requisito de producto”.





## **CAPÍTULO 4**

# **MANTENIMIENTO DE RUEDAS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

La acumulación de daño por fatiga, deformación plástica y desgaste, reduce de manera significativa la vida en servicio del material ferroviario. En la actualidad, los aumentos tanto de velocidad como de carga por eje en los vehículos ferroviarios, conducen a tensiones elevadas en el contacto rueda-carril. Esta evolución conduce a cambiar el principal daño existente en la llanta de la rueda, de desgaste a fatiga. A diferencia de los lentos procesos de deterioro por desgaste, la fatiga causa fracturas abruptas en las ruedas o pérdidas de material en la superficie de la banda de rodadura. Estos fallos pueden causar daños en raíles, en suspensiones de trenes y, aunque no ocurre con frecuencia, pueden conducir al propio descarrilamiento del tren.

El problema de fatiga de ruedas ferroviarias se refiere a menudo, al fenómeno de RCF (Rolling Contact Fatigue), causado por esfuerzos repetidos en el contacto rueda-carril durante el movimiento de rodadura. Para comprender el mecanismo fundamental del fenómeno de RCF se requiere un conocimiento detallado de la zona de interacción



entre rueda y carril. También se requiere un modelo de acumulación de daño por fatiga multiaxial bajo un estado tensional complejo en el contacto rodante.

Aunque la fatiga es el principal fenómeno de daño en ruedas ferroviarias, existen otros tipos de daño como desgaste, esfuerzos térmicos y deformaciones que afectan a la integridad de la rueda, en ocasiones provocando imperfecciones más destructivas que la propia fatiga. Por tanto la existencia de un riguroso plan de mantenimiento en ruedas ferroviarias es de gran importancia para la seguridad de los trenes y el control de las fisuras existentes debido a la fatiga, representando el mantenimiento de las ruedas entre un 30% y un 50% de los costes totales de mantenimiento. La mayoría de estos costes están asociados a los reperfilados de las ruedas. Debido a este elevado coste de mantenimiento, para reducirlo es necesario reducir las cargas dinámicas en las ruedas, evitando de esta manera el deterioro y fractura de los componentes del vehículo y de la vía, reduciéndose así los niveles de vibración y ruido.

## **4.2 DEFECTOS EN RUEDAS FERROVIARIAS**

En primer lugar se deben conocer todos los tipos de daño que existen en las ruedas ferroviarias o que pueden aparecer en ellas y el motivo de su aparición, ya sea por esfuerzos mecánicos, térmicos o por otras causas. De esta manera se puede definir de una forma más eficaz y segura el plan de mantenimiento, conociendo cualquier posible causa de deterioro en las ruedas.

### **4.2.1. ESFUERZOS EXISTENTES EN RUEDAS**

Los grandes esfuerzos a los que están sometidas las ruedas se deben a las cargas por rueda y a las fuerzas de guiado. La banda de rodadura es la parte de la rueda que más esfuerzos soporta, apareciendo en la banda de rodadura de las ruedas motrices y de las ruedas sobre las que se aplican los frenos, deslizamientos y altas cargas térmicas.

Los esfuerzos a los que está sometida la rueda pueden clasificarse desde el punto de vista del tiempo transcurrido en el que se manifiestan o también desde el origen de dichos esfuerzos. Desde el punto de vista del espacio de tiempo en el que se manifiestan, los esfuerzos se clasifican en:



## **CAPÍTULO 4**

### **MANTENIMIENTO DE RUEDAS**

- Esfuerzos constantes o de variación lenta en el tiempo. En este grupo se incluyen las tensiones residuales de fabricación, las tensiones de calado de ruedas y eje, y las tensiones permanentes desarrolladas tras una frenada de larga duración.
- Esfuerzos que se manifiestan de forma intermitente. En este grupo se incluyen las tensiones debidas a gradientes térmicos.
- Esfuerzos cíclicos. Se manifiestan en la zona elasto-plástica de contacto entre rueda y carril y son las tensiones ligadas a la rodadura. Se deben a la carga, al esfuerzo de tracción y pseudodeslizamiento. Aunque las cargas no sean muy elevadas, se pueden producir en la zona de contacto rueda-carril deformaciones plásticas en la llanta. Durante los primeros ciclos de carga se introducen en la rueda tensiones residuales, que junto a las deformaciones existentes, producen un endurecimiento del material.

La otra clasificación de los esfuerzos desde el punto de vista de su origen es:

- Esfuerzos térmicos. Las frenadas y los esfuerzos motores o retardadores cuando se produce patinaje debido a la pérdida de adherencia entre la rueda y el carril, provocan la aparición de dichos esfuerzos, que afectan sobre todo a la zona de la banda de rodadura, pudiendo llegar a producir transformaciones metalúrgicas en el acero (templado de las zonas que han patinado). Fuertes frenadas pueden crear tensiones que exceden en ciertas zonas el límite elástico del material, provocando modificaciones en el campo de tensiones residuales, favoreciendo de esta manera la evolución de fisuras en zonas profundas.
- Esfuerzos mecánicos. La existencia de un esfuerzo vertical aplicado sobre la banda de rodadura en el contacto rodante y un esfuerzo lateral sobre la pestaña debidos a la carga por rueda y al guiado sobre la vía, provocan la aparición de esfuerzos mecánicos.

Los esfuerzos dependen del diseño del bogie, del diámetro y tipo de rueda, carga por eje, valor de la masa no suspendida, suspensión y de los sistemas de guiado y frenado. También dependen de las condiciones de utilización, como puede ser la velocidad, carga y tipo de trenes, y de las condiciones de acoplamiento entre la rueda y el carril, como pueden ser sus perfiles. Además los esfuerzos también dependen de defectos existentes en las ruedas, como defectos de fabricación, ovalización, diferencia de diámetros entre ruedas de un mismo eje, entre otros.

#### 4.2.2. CATEGORÍAS DE DAÑO

Los esfuerzos citados anteriormente provocan unos daños en el material de la rueda, que en algunas ocasiones pueden ser muy peligrosos para la seguridad ferroviaria. Los principales tipos de daño en ruedas se agrupan en términos generales, en desgaste, fatiga, deformación, térmico y de infraestructura.

**Desgaste.** El daño desarrollado está asociado con un mecanismo de desgaste que causa cambios en el perfil de la rueda. Dichos cambios se producen principalmente en la banda de rodadura aunque sin descartar el desgaste en la pestaña de la rueda.

**Fatiga.** Actualmente, los desarrollos en sistemas de protección frente al deslizamiento de ruedas han reducido los números de planos de ruedas que por tanto requerían volver a perfilar. Estos avances y el uso de bogies con una ejecución de marcha cada vez más estable, han conducido a más ejemplos de fatiga relacionada con daño en la banda de rodadura, debido al menor número de reperfilados que se hacen actualmente. Un comportamiento de marcha más consistente, bajos niveles de desgaste y reducidos niveles de reperfilado para eliminar planos de rueda, conducen a que la banda de rodadura esté sometida a un gran número de kilómetros antes de ser reperfilada. El desarrollo de la red de fisuras por fatiga puede provocar pérdidas de material causando la formación de cavidades, conociéndose este tipo de fisuras como “shelling” (fisuras subsuperficiales con pérdida de material).

**Deformación.** Altas presiones de contacto, fuerzas de arrastre y/o materiales no homogéneos pueden conducir a esta tercera categoría de daño en la banda de rodadura asociado con deformación del material, dicha deformación se puede encontrar distribuida en toda la banda de rodadura o localizada en diversos puntos.

**Térmico.** Cargas térmicas procedentes de frenadas, sea desde el deslizamiento de los ejes montados o el calor generado durante bloqueo de las ruedas causan unos tipos de daños muy variados. El proceso de pérdida de material de la banda de rodadura es el resultado del desarrollo de una red de fisuras, seguida de la creación de martensita en la zona afectada por el calor, conociéndose esta red de fisuras superficiales como “spalling”.

**Infraestructura.** El ferrocarril moderno es un sistema con una interacción clave entre rueda y carril. Por tanto hay un rango de daños que son dependientes de la infraestructura junto con el sistema crítico de la interacción rueda y carril.

El fabricante de vehículos ferroviarios Bombardier, tiene su propia clasificación de daños en ruedas ferroviarias, son los llamados códigos “Why”, utilizados a menudo para tener una identificación de cada tipo de daño que permita su descripción y registrar con estos códigos las razones de por qué un eje montado en particular, requiere una operación de perfilado o cambio.

#### 4.2.2.1. DESGASTE EN LA BANDA DE RODADURA (HW)

“Hollow wear” (HW) es el término dado para el desgaste existente en el centro de la banda de rodadura. Este efecto de desgaste concentrado, a menudo se produce debido al uso de bogies de marcha muy estables que circulan preferentemente por rutas muy rectas. La interacción de las zapatas de frenado con la banda de rodadura puede, dependiendo de su configuración y la selección del material, también acelerar el desarrollo de este tipo de desgaste.

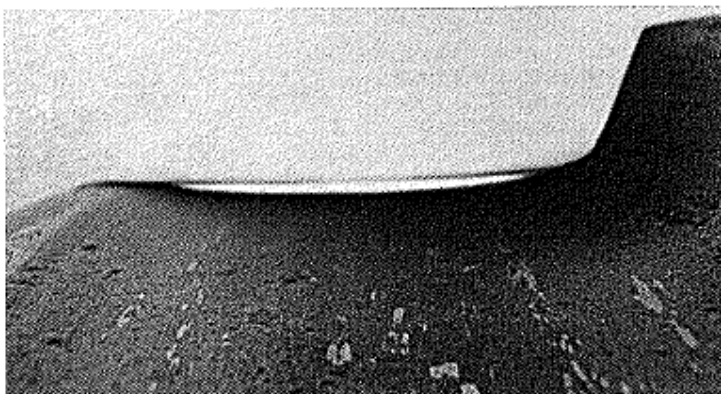


Figura 1 “Hollow Wear”. El desarrollo de una falsa pestaña en la parte contraria a la pestaña perteneciente a la rueda se está claramente ilustrado en la imagen.

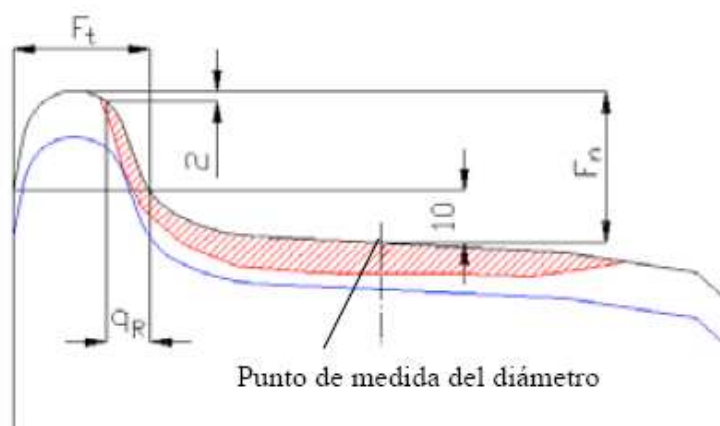


Figura 2 Puntos de medida del ancho de pestaña ( $F_t$ ), altura de pestaña ( $F_n$ ) y  $q_R$  que es la distancia horizontal desde el punto de medida del ancho de pestaña hasta 2mm por debajo del punto más alto de la pestaña.

Debido a que las medidas de la rueda se toman en el plano del círculo en la banda de rodadura, para las medidas de altura de la pestaña y anchura de la misma, el desgaste HW puede causar un incremento de dichas medidas, aunque realmente no son medidas reales, si no debidas a dicho desgaste.

El desarrollo de este tipo de desgaste afecta a la conicidad efectiva del eje montado. Si el desgaste aumenta, puede en ciertos casos afectar a la dinámica y a los límites de estabilidad del vehículo.

Si este tipo de desgaste es muy significativo en el centro de la banda de rodadura, puede causar el desarrollo de la llamada “falsa pestaña”, como se ha visto en la figura 1. No sólo puede afectar el desarrollo de una falsa pestaña en la dinámica del vehículo, si no también no conviene que ocurra, ya que puede ocasionar daños importantes tanto en la cabeza del carril como en los cambios y cruces de vía.

El desgaste durante los primeros kilómetros de vida de la rueda es uniforme en toda la banda de rodadura, siendo después mayor en dos zonas, cerca de la pestaña y en el extremo opuesto a la misma. Este desgaste se debe principalmente a las fuerzas de arrastre que actúan en la banda de rodadura cuando la rueda opuesta está con la pestaña haciendo contacto en el carril.

Las características de rueda y carril en la zona de contacto son casi imagen la una de la otra, así las tensiones máximas a cortadura en la rueda y en el carril serán similares. El desgaste de rueda y carril depende de la dureza de sus materiales y es, en general,



bastante lento, alrededor de 1.5 a 3 mm de media cada 100000 km. El aumento de la velocidad de los trenes ha producido un aumento del desgaste y de las tensiones.

El uso de aceros de mayor resistencia y la optimización de la lubricación llevada a cabo en los últimos años ha traído como consecuencia que el desgaste disminuya, pero a costa del aumento de la fatiga en contacto rodante (RCF).

El peso máximo por eje actualmente permitido en Europa es de 25000 kg, aunque se están planteando la posibilidad de aumentar dicho peso máximo hasta los 30000 kg para aumentar la capacidad de carga de los trenes, especialmente los de mercancías. Este aumento puede producir serios problemas, como un rápido desgaste de los carriles, daño en las juntas aislantes, riesgo de fallo de los carriles por fatiga y fractura, etc.

#### **4.2.2.2. DESGASTE DE LA PESTAÑA (FW)**

El desgaste de la pestaña, FW, afecta tanto a la cara de la pestaña como a la parte posterior de la misma. Se trata de fisuras de progresión axial que pueden afectar a una o varias zonas de la pestaña.

Este tipo de fisuras pueden tener origen térmico o mecánico. En el caso de origen térmico la aparición de dichas fisuras se debe a una fricción severa de la zapata de freno sobre la pestaña, por el uso de zapatas de geometría inadecuada. En el caso de fisuras de origen mecánico, las fisuras se producen por presiones anormales entre pestaña y carril debidas a trazados de vía deficientes. Estas fisuras pueden verse en los trenes de mercancías principalmente, aunque no es muy habitual especialmente en Europa.

El desgaste de la cara de la pestaña está típicamente influenciado por la curvatura de la ruta seguida, la infraestructura, características del bogie y el régimen de lubricación. También se sabe que los desgastes elevados de la cara de la pestaña están causados por unas secciones con juegos muy limitados, es decir, muy ajustados. En casos donde se produce un desgaste intenso de la cara, se puede observar un desgaste menor en la vía por la que circulan dichas ruedas.

Si hay una diferencia notable en el desgaste de la pestaña entre los lados diferentes de un vehículo, esto normalmente indica la existencia de un perfil o régimen de lubricación asimétrico. Un desgaste asimétrico diagonalmente del bogie puede indicar también ser resultado de una puesta en marcha incorrecta del vehículo.



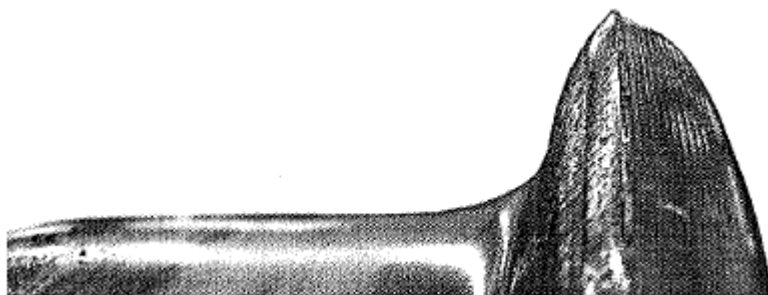


Figura 3. Desgaste moderado en la cara de la pestaña

El desgaste de la parte posterior de la pestaña es causado por contacto con obstáculos en la vía, desvíos y cruces. Tranvías y otros vehículos como el tren ligero, los cuales predominantemente circulan por carriles acanalados, pueden naturalmente sufrir altos niveles de desgaste de la parte posterior de las pestañas, aunque también pueden producirse en el material rodante de las líneas principales y de Metro.

Irregularidades en la base y punta de la pestaña tales como una pestaña puntiaguada o un radio anormal en la base de la pestaña, pueden entrar dentro de esta clasificación de daño. Tales irregularidades no deben exceder los límites aplicables que figuran en el manual de mantenimiento del vehículo, para asegurar una interacción segura en cruces y desvíos.

El desgaste en la pestaña es más severo durante los primeros 500 km, mientras que después se reduce. Este mayor desgaste inicial se debe al hecho de que el perfil nuevo contacta con el carril en una pequeña zona, soportando elevados valores de presión y, por lo tanto, con una alta fricción.

#### 4.2.2.3. PÉRDIDA DE CIRCULARIDAD DE LA RUEDA

Principalmente existen dos formas de pérdida de circularidad de la rueda, periódica o aleatoria.

Para la pérdida de circularidad periódica (POOR), la no circularidad de la rueda es regular y su forma se puede determinar. Por ejemplo una rueda con POOR de tercer orden tiene una forma triangular y con cuarto orden tiene forma cuadrática. Tales formas periódicas de pérdida de circularidad pueden ser causadas como resultado de un sistema de interacción o del proceso de mecanizado de la rueda. En ruedas resistentes aparecen números de orden elevados.



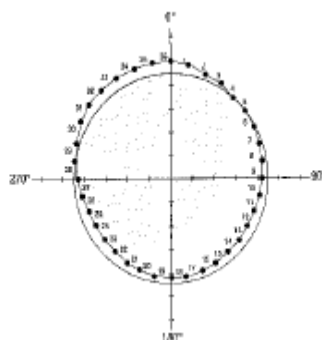


Figura 4. Primer orden POOR - Excéntrica.

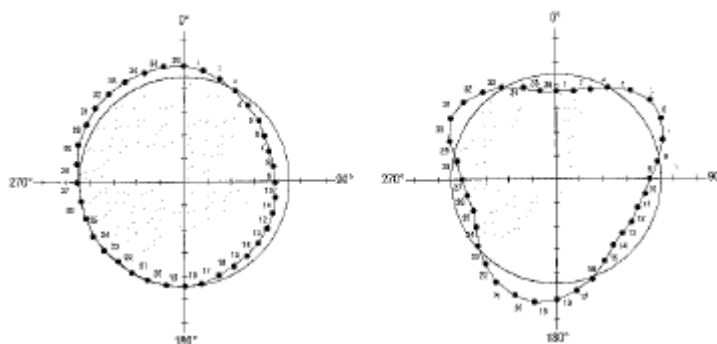


Figura 5. Segundo orden POOR – Óvalo. Tercer orden POOR – Triángulo

Cuando el modelo de pérdida de circularidad no se puede determinar y por tanto es aleatorio, entonces a este caso se lo conoce como SOOR.

Este fenómeno a menudo se causa por la presencia de una microestructura muy variada dentro de la banda de rodadura, como resultado de la aplicación de los tratamientos térmicos durante la fabricación de la rueda. La superficie de la banda de rodadura idealmente debería ser perlítica y no debería contener ninguna mezcla adicional de bainita y martensita.

La magnitud de las irregularidades radiales desarrolladas debido a la presencia de una microestructura variada puede encontrarse en el rango de 0.5 – 1.0 mm.

Después del primer o posiblemente segundo perfilado tales áreas que contienen una microestructura variada deberían haber sido eliminadas y en relación con esto no se

debería desarrollar ninguna pérdida de circularidad aleatoria, que es el caso que nos ocupa.

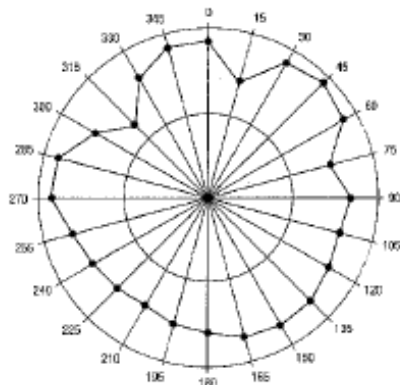


Figura 6. Rueda con pérdida de circularidad aleatoria, SOOR.

Si no hay disponible ninguna técnica automática para llevar a cabo las medidas de pérdida de circularidad, entonces se puede medir de manera manual usando un DTI, Dial Test Indicator. Cuando se use tal aproximación manual las irregularidades radiales deberían ser medidas en al menos 24 puntos igualmente espaciados a lo largo de toda la circunferencia de la rueda sobre el plano de la banda de rodadura así como a lo largo de dos planos situados a 10 mm a cada lado del plano de la banda de rodadura. Para ruedas de locomotora de grandes diámetros la resolución debe ser más fina, por tanto las medidas se tomarán cada 36 o 48 puntos o cuando los resultados obtenidos sean los apropiados.

#### 4.2.2.4. RCF, ROLLING CONTACT FATIGUE. RCF1, RCF2, RCF3 Y RCF4.

RCF, es el término dado al daño relativo de fatiga, inducido por la acción repetida de una fuerza de arrastre resultante, además de las fuerzas verticales de contacto rueda-carril actuando sobre la misma área de la rueda.

Los ciclos repetidos de carga y descarga sobre la banda de rodadura de la rueda junto con las fuerzas de deslizamiento adicionales, conducen a través del proceso conocido como “ratcheting”, a una deformación plástica del material.

Una vez se supera la ductilidad del material por el incremento de deformación plástica, las fisuras empezarán a iniciarse y a propagarse por estar sometidas a ciclos de carga repetidos en el material, en dirección paralela al plano de deformación del

material. Una vez las fisuras han alcanzado cierto tamaño, también se propagarán debido a la presión hidrostática aplicada por algunos fluidos que entran en las fisuras desde la banda de rodadura o por la cabeza del carril y quedan atrapados por la rotación de la rueda a lo largo del carril.

En ciertas ocasiones las redes de fisuras se pueden haber desarrollado lo suficiente para que ocurra el fenómeno de “shelling”. Término utilizado para el proceso de pérdida de material desde la banda de rodadura, siguiente al establecimiento de una red de fisuras por fatiga.

Como las fisuras se propagan además dentro de la banda de rodadura su alineación cambiará lentamente desde su ángulo tangencial inicial y empieza a adoptar una alineación más radial.

Debido a la diferencia longitudinal y a las fuerzas laterales presentes dentro de varias zonas de la banda de rodadura de la rueda, se obtienen cuatro clasificaciones de RCF dependientes de la localización.

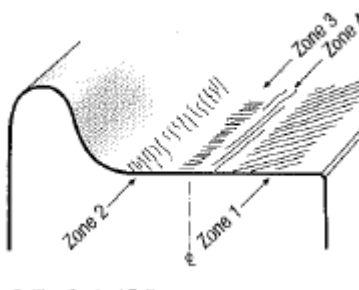


Figura 7. RCF. Localizaciones relativas a zonas de la rueda.

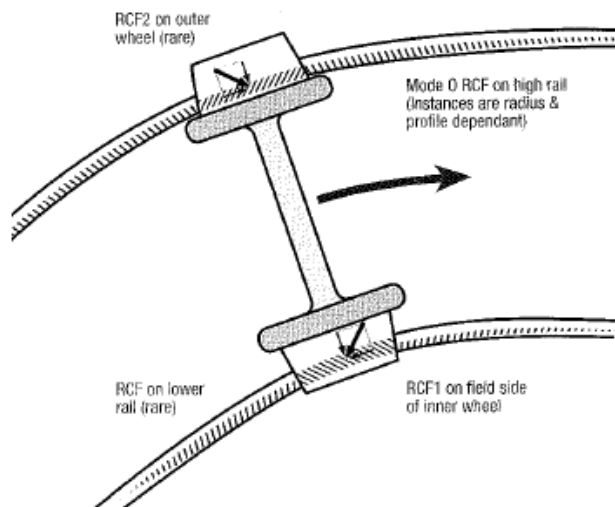


Figura 8. Desarrollo de RCF dentro de una curva.

Debido a la reacción igual y opuesta de las presiones de contacto y las fuerzas de deslizamiento involucradas, el daño por RCF afecta tanto a ruedas como a carril. Sin embargo, debido a la diferencia de orientaciones y de magnitudes de fuerzas resultantes, los efectos varían.

Por ejemplo cuando aparece RCF clásico por el paso por una curva, las esquinas de la parte superior de los carriles y en general los perfiles, son afectados además de las ruedas por este tipo de daño. El proceso de creación de este tipo de daño también llamado “Head Checks” es referido a un Modo 0 RCF. Mientras para el eje montado será la rueda interior del eje, la que probablemente estará más afectada por el modo RCF1.

Típicamente los carriles son más sensibles a los efectos relativos a las fuerzas de tracción, mientras las ruedas son afectados con más frecuencia por fuerzas relativas a frenadas.

#### 4.2.2.4.1. ZONA 1. RCF1

La acción repetida de las fuerzas de deslizamiento longitudinales y laterales inducidas por el paso por curva pueden dar origen a la variante clásica de RCF en la parte 1 de la banda de rodadura (zona 1), produciéndose principalmente en la parte exterior de la rueda que circula por la parte interna de la curva. Las diferentes relaciones

entre las fuerzas de deslizamiento longitudinal y las fuerzas de deslizamiento lateral influenciarán en el ángulo de la red de fisuras, el cual típicamente estará entre  $30^\circ - 45^\circ$  sobre el eje de la rueda.

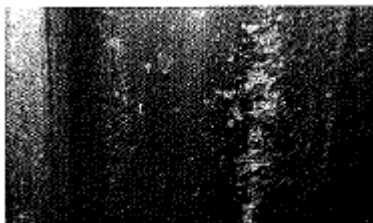
a)



b)



c)



d)



Figura 9 a) Fisuras en Zona 1 por RCF. b) Inicio del proceso de desprendimiento de fisuras por RCF1. c) Desprendimiento de fisuras RCF1, totalmente estabilizadas. También son visibles fisuras RCF2 en la pestaña. d) Desprendimiento más profundo de fisuras RCF1.

#### 4.2.2.4.2. ZONA 2. RCF2

Este daño es causado por los mismos mecanismos y fuerzas que intervienen en RCF de la Zona 1 excepto que ocurre por la interacción de la rueda en su zona más cercana a la pestaña con el carril exterior de la curva, el cual está más elevado que el interior debido al peralte existente en la curva.

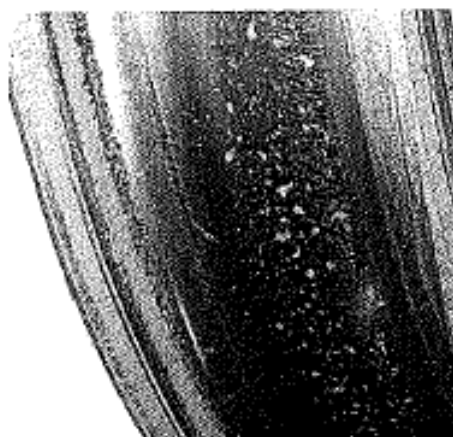


Figura Z.10. Fisuras por RCF en la zona 2 adyacente a la pestaña. Una banda de fisuras RCF1 así como hendiduras por granos de arena son también visibles.

La Zona 2 RCF típicamente ocurre con mucha menos frecuencia que la Zona 1 RCF. Debido a los cambios en la geometría y presión de contacto en la banda de rodadura mientras la rueda está en servicio, las fisuras por RCF en la zona 2 “desaparecen” debido al desgaste sufrido, a menos que se hayan establecido dichas fisuras permanentemente. Las fisuras de la zona 2 adoptan típicamente un ángulo alrededor de los 30° - 60° sobre el eje de la rueda.

#### 4.2.2.4.3. ZONA 3. RCF3

El crecimiento de fisuras por fatiga en el centro de la banda de rodadura es un fenómeno poco frecuente que ocurre por la aplicación repetida de elevadas fuerzas longitudinales de tracción que dan origen a deslizamiento longitudinal. Por ejemplo para vehículos que sufren de manera regular casos de niveles elevados de deslizamiento de ruedas o incluso rodadura pura cuando se aplica tracción para bajas velocidades, pueden empezar a exhibir tal daño por fatiga.

Debido a la componente longitudinal pura de las fuerzas de deslizamiento involucradas, las fisuras se orientan lateralmente a través de la banda de rodadura de la rueda y adoptaran un perfil con forma recta o en “C”. Hay que tener cuidado no confundir esas fisuras por fatiga con su orientación lateral de 0° - 10° con el eje del vehículo, con las fisuras laterales por efecto térmico que son más críticas, asociadas con el sobrecalentamiento de la llanta en la banda de rodadura o por el bloqueo de frenos.

Una causa directa de las fuerzas de deslizamiento longitudinales que causan RCF en zona 3, son los diferentes diámetros de rueda dentro de un bogie, especialmente cuando los ejes son acoplados mecánicamente, y su instalación no es correcta dentro del bogie. Este hecho causa una fuerza de deslizamiento longitudinal permanente aplicada de manera constante tangente a la vía. En este caso la alineación de la fisura puede adoptar un ángulo de orientación más amplio.



Figura 12. Fisuras en la zona 3 causadas por el desajuste del diámetro de la rueda después de un reperfilado.

#### 4.2.2.4.4. ZONA 4. RCF4

Las fisuras pertenecientes a esta región tienen una orientación longitudinal significativa de unos  $70^\circ$  -  $80^\circ$  aproximadamente sobre el eje de la rueda, lo cual indica que están inducidas como consecuencia de una fuerza resultante lateral de deslizamiento. De manera similar como ocurre en la zona 2 RCF, por la rotación sufrida por el perfil de la rueda en servicio, a menudo se observarán algunas áreas locales de elevadas presiones de contacto locales o algunos efectos locales modificadores en el perfil (debido al desgaste o a la deformación plástica). Por tanto estas fisuras de la zona 4 pueden “desaparecer” debido al desarrollo del perfil de la rueda, en servicio.

Si los niveles de desgaste existentes en el perfil son lo suficientemente altos para cambiar constantemente la superficie de la banda de rodadura, entonces el fenómeno de RCF no se establecerá. De esta forma, el fenómeno de desgaste en el contacto rueda/carril puede verse como un fenómeno positivo. El llamado Magic Wear Rate es la tasa de desgaste necesario para conseguir una superficie de contacto lo suficientemente renovada para evitar el establecimiento o propagación de una red de fisuras por RCF. En relación con esto hay que conseguir el balance óptimo entre desgaste y fatiga.



#### 4.2.2.5. RCF CLUSTERS. CLUS

En este tipo de daño el fenómeno RCF tiene su efecto de daño localizado en la agrupación de fisuras existentes, pudiendo ocurrir en el centro de la banda de rodadura de la rueda. Estas agrupaciones a pesar de estar localizadas tienen un mecanismo de desarrollo similar al de RCF convencional.

Una vez originadas, tal agrupación de fisuras se propagan de manera significativa y conducen a un desprendimiento localizado en la banda de rodadura. Esto puede convertirse en un peligro incluso después de transcurrir un kilometraje limitado, desde dicho desprendimiento. La agrupación de fisuras RCF está también asociada con deformación plástica del material y fenómenos de “racketting” en común con RCF convencional. Al principio el crecimiento de fisura tiene un ángulo de inclinación sobre la banda de rodadura, tendiendo a una orientación más radial, profundizando sobre dicha superficie. Debido a la presencia de deformación plástica local por las crecientes fuerzas laterales de deslizamiento, se observa a veces que el desarrollo de una agrupación de fisuras por RCF, puede haber sido precedido por un desgaste severo en la banda de rodadura localizado.



Figura 13. Cavidad formada por el desprendimiento de un RCF Cluster

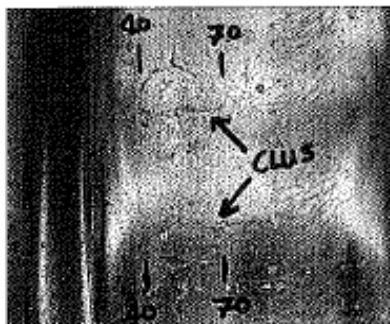


Figura 14. Rueda con dos RCF Clusters además de una banda de RCF1



Debido a la propagación en profundidad de las agrupaciones de fisuras “RCF cluster”, el tamaño del área afectada puede aparecer más extenso durante los reperfilados.

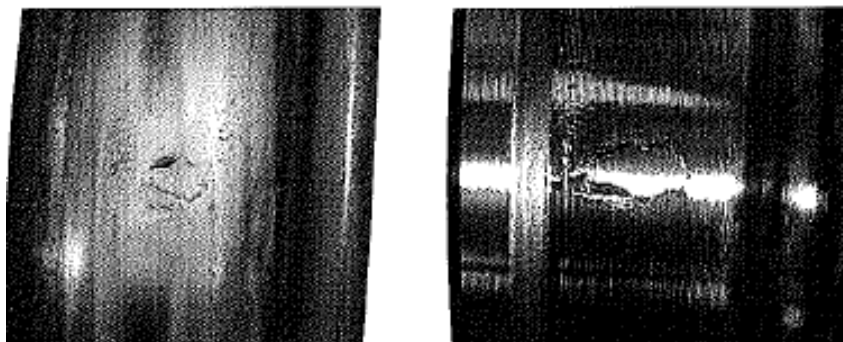


Figura 15. RCF Cluster antes y después de reperfilar con una profundidad de 2.5 mm.  
Notar el incremento del tamaño aparente del “Cluster”

#### 4.2.2.6. FATIGA SUBSUPERFICIAL. SUB

Esta forma de daño en rueda, aunque es raro que ocurra, puede conducir a la pérdida de una sección de la llanta.



Figura 16. Una fisura por fatiga subsuperficial que se ha propagado sobre la cara de la llanta

Las fisuras por fatiga subsuperficial normalmente, pero no exclusivamente, se inician por la presencia de cuerpos extraños, escoria o pérdidas en la homogeneidad metalúrgica del material dentro de la llanta. Según la rueda se aproxima a su límite de desgaste, las tensiones dentro de la rueda se incrementan; esto junto con el incremento de la acumulación de cargas cíclicas influyen en que alguna pérdida de homogeneidad dentro del material puede convertirse en un punto de inicio de fisura por fatiga. Si el vehículo está sometido a operar sobre secciones de vía corrugada o ha sufrido daños en la banda de rodadura, entonces las tensiones generadas pueden ser todavía mayores.

Con las mejoras globales en desarrollos de ruedas de acero sin impurezas, los procesos de inspección de ruedas por ultrasonidos y los regímenes de pulido de vías que controlan los raíles corrugados, los ejemplos de fisuras por fatiga subsuperficial son cada vez menores, pero la no utilización de aceros de alta calidad para ruedas ferroviarias provoca la existencia todavía de este tipo de daño debido a las inclusiones.

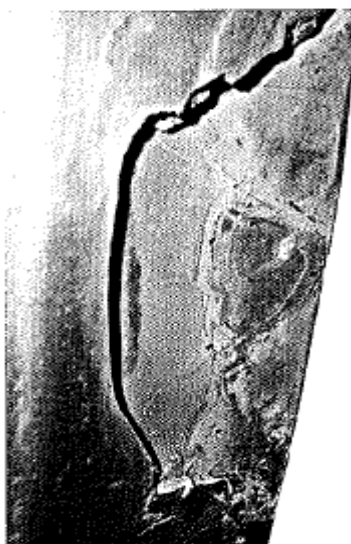


Figura 17. Pérdida de material en una zona de la banda de rodadura debido a una fisura subsuperficial.

Hasta que dichas fisuras no han llegado a la zona superficial de la banda de rodadura, las fisuras subsuperficiales sólo pueden ser detectadas en servicio usando una metodología de ensayo no destructiva volumétrica, como por ejemplo, ensayos con ultrasonidos. Aunque una vez que la fisura subsuperficial se ha propagado lo suficiente hasta alcanzar la superficie de la cara de la llanta o posiblemente la cara posterior de la pestaña, este tipo de fisuras pueden detectarse visualmente.

La consecuencia de la pérdida de un segmento de la banda de rodadura de la rueda debido al desarrollo completo de una fisura subsuperficial es peligrosa, ya que en ocasiones la pérdida del segmento puede incluir una sección de la pestaña lo cual puede incrementar de manera significativa el peligro por descarrilamiento cuando existen en el recorrido curvas cerradas, desvíos o cruces.

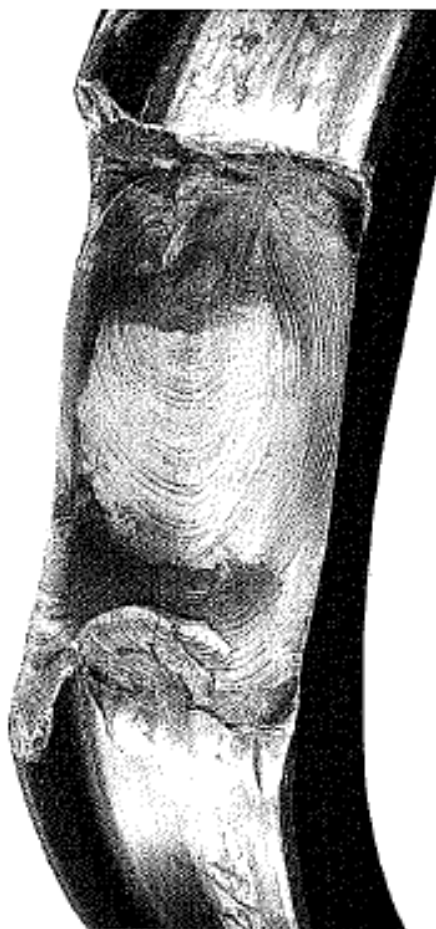


Figura 18. Fisura por fatiga subsuperficial que causa la pérdida de una sección de la pestaña así como de la banda de rodadura

#### **4.2.2.7. DEFORMACIÓN LATERAL EN LA BANDA DE RODADURA. TRO**

Este tipo de daño por deformación lateral, causa un labio desarrollado sobre la parte del chaflán en la banda de rodadura de la rueda.

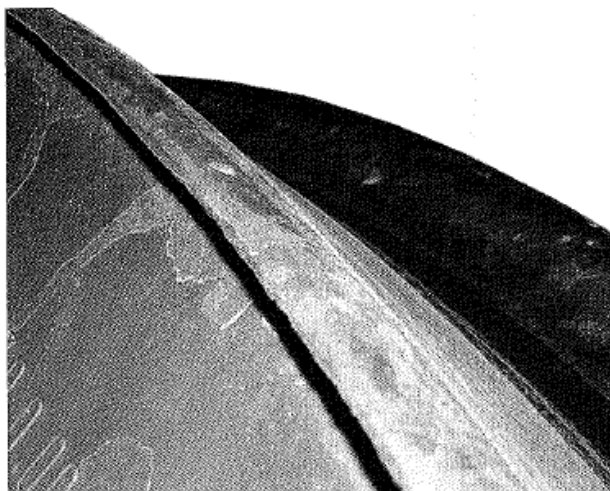


Figura 19. Un ejemplo clásico de Tread Roll Over el cual ha creado un labio que sobresale de la cara de la llanta

La cantidad permisible de deformación lateral se establece normalmente en el manual de mantenimiento del vehículo. Hay variaciones en redes y vehículos donde está permitida cierta cantidad de deformación.

Típicamente las locomotoras sufren con más frecuencia este tipo de daño que otros tipos de vehículos de las redes principales. Esto se debe a que las locomotoras junto con sus grandes ejes cargados, generalmente aplican fuerzas muy elevadas de tracción mientras circulan por curvas cerradas.

En ciertas ocasiones tras una deformación lateral de la llanta, en la zona de la banda de rodadura se pueden producir ahondamientos y también puede ser que el chaflán se desplace lateralmente debido a dicha deformación.

#### **4.2.2.8. COLAPSO LOCAL DE LA BANDA DE RODADURA**

Este tipo de daño localizado puede conducir a deformaciones laterales y a pérdidas de circularidad en las ruedas. Se generan disminuciones en las medidas del radio de la rueda que pueden llegar al milímetro de longitud. La detección de este tipo de daño se consigue por la activación de una señal basada en sensores de carga en ruedas, que reflejan sobrecargas verticales transmitidas a la vía.

Esta categoría de daño tiene en común con el RCF, que aparece como un fenómeno único en ruedas individuales y puede ocurrir en ausencia de martensita u otros tipos de daño térmico. Después del daño por deformación plástica lateral, la red de fisuras puede entonces desarrollarse hacia el centro de la banda de rodadura, lo que puede conducir a desprendimientos de material y la formación de cavidades locales en la rueda.

#### 4.2.2.9. PLANOS DE RUEDA. FLT

Los planos de rueda (Wheelflats) es posiblemente la forma más clásica de daño. Este fenómeno está causado después del bloqueo total o parcial de un bogie mientras el vehículo está todavía en marcha, produciéndose deslizamientos sobre el carril. Esto da origen a elevados niveles de deslizamiento (diferencia entre la velocidad de rotación de la circunferencia de la rueda y la velocidad lineal del vehículo) entre la rueda fija o casi fija y la vía.

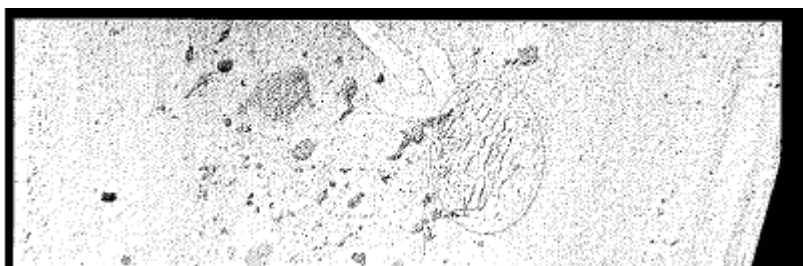


Figura 20. Vista cercana del plano en la rueda por donde las fisuras se han iniciado dentro de la zona afectada por el calor

Una idea equivocada y muy común, es que el daño por planos de ruedas se causa por la acción abrasiva de la rueda, por el deslizamiento de ésta a lo largo de la cabeza del carril. Sin embargo es el daño térmico resultante de la entrada significativa de calor por el deslizamiento, el que causa la mayoría del daño, aunque en ocasiones puede también llevarse a cabo una pequeña cantidad de abrasión mecánica. Por el deslizamiento de la rueda sobre el carril, la fricción resultante calienta localmente la parte de contacto con la rueda, la cual puede alcanzar temperaturas significativas ( $800^{\circ}$  -  $850^{\circ}\text{C}$ ), necesarias para transformar el material de la rueda de acero perlítico en austenita. Como la parte de contacto en la rueda se enfría rápidamente después que el deslizamiento ha cesado, especialmente una vez que la rueda empieza a girar de nuevo y entra otra vez en contacto con la cabeza fría del carril, la austenita se transforma en



martensita debido a este enfriamiento rápido. La martensita es una forma muy dura y frágil del acero que tiene una apariencia plateada.

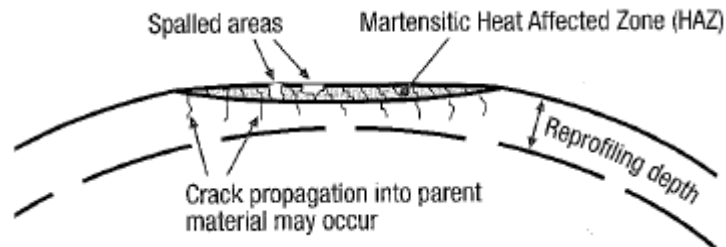


Figura 21. Representación esquemática de una sección de corte de un plano de rueda.



Figura 22. Plano de rueda por el bloqueo del eje que ha comenzado a fisurarse superficialmente

Debido a la aplicación de ciclos adicionales de cargas mecánicas en el área de contacto, se desarrollan fisuras en la zona afectada por el calor. Éstas se propagan hasta que la zona de acero martensítico endurecida que ha sido afectada por el calor empieza a desprenderse dejando cavidades en la banda de rodadura. Estas cavidades producen cargas mecánicas por el golpeteo, y conducen a pérdidas radiales significativas asociadas con los planos de rueda. Ocasionalmente la red de fisuras puede propagarse por debajo de la zona afectada por el calor dentro del material que la rodea.

Ambas ruedas del mismo eje convencional están expuestas a planos de rueda significativos inducidos por deslizamientos que provocarán daños en dichas ruedas,

aunque posiblemente con extensiones diferentes, exactamente en la misma posición angular.

Los planos de ruedas pueden desaparecer con los reperfilados, aunque se debería tener en cuenta la profundidad del corte que es necesaria para eliminar todo el material afectado por el calor y todas las redes de fisuras restantes situadas bajo la capa de martensita.



Figura 23. Plano de rueda significativo y reciente como resultado de un bloqueo parcial del bogie



Figura 24. Plano de rueda con desprendimiento

#### 4.2.2.10. FORMACIÓN DE MARTENSITA DESPUÉS DE UN DESLIZAMIENTO. SLP

El daño por deslizamiento puede parecer que solo afecta a la apariencia de la rueda, ya que la delgada banda plateada de martensita que aparece en la banda de rodadura puede desaparecer con la marcha. Lo que hay que tener en cuenta es que la banda plateada si que puede desaparecer de la banda de rodadura, pero sin embargo es bastante peligrosa ya que esencialmente es una prolongación del mecanismo de fallo que crea un plano de rueda. En este caso se pueden formar cavidades después de la fisuración superficial de la martensita por las zonas más afectadas por el calor.

Deslizamientos en la tracción para velocidades del vehículo bajas típicamente ocasionan daño por fatiga RCF3, mientras que deslizamientos para velocidades altas del vehículo es más normal que causen este efecto térmico distribuido. En ocasiones un

deslizamiento longitudinal durante una frenada puede ser que no sea suficiente para provocar un plano en la rueda, a pesar del bloqueo total o parcial de la misma, pero puede ocasionar esta forma distribuida de daño térmico.

En el caso de deslizamientos de cierta intensidad, se requiere una corrección vía reperfilado para eliminar la zona afecta por el calor y como consecuencia las redes de fisuras.

#### 4.2.2.11. SOBRECARGA TÉRMICA. HOT

En vehículos donde la banda de rodadura se usa para frenar el vehículo, existen niveles significativos de calor transferido desde la llanta hacia el interior de la rueda, como consecuencia de la conversión de energía cinética en energía térmica. El arrastre de las zapatas, frenadas prolongadas u otras acciones inapropiadas, afectan a la integridad de la banda de rodadura; una rueda puede calentarse más allá de su capacidad térmica para la que fue diseñada y por tanto sufrir una sobrecarga térmica.

Los efectos visuales de las sobrecargas térmicas, son la decoloración de la pintura de la llanta y una decoloración del acero de la rueda en la banda de rodadura, por la cara de la llanta. Las consecuencias son el cambio de signo de las tensiones residuales de compresión existentes en la llanta y/o el inicio de fisuras laterales en la banda de rodadura si las temperaturas y duración del sobrecalentamiento son excesivas.

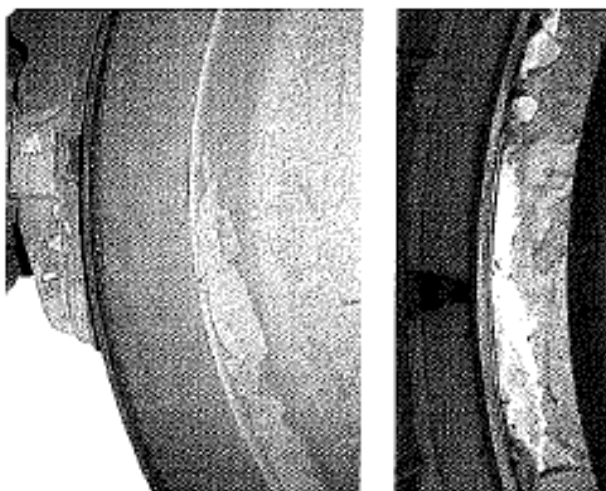


Figura 25 Rueda que ha sufrido una sobrecarga térmica, destaca la decoloración y pérdida de la pintura.



#### 4.2.2.12. Fisuras térmicas laterales. LAT

Después de una sobrecarga térmica por la acción de frenado, se pueden desarrollar fisuras térmicas laterales en la banda de rodadura. La presencia de fisuras térmicas laterales es un factor relevante en la seguridad, ya que estas fisuras pueden propagarse lateral y radialmente a través de la llanta y hacia el velo de la rueda. En el caso extremo, puede producirse un fallo catastrófico por la aplicación de cargas mecánicas y térmicas posteriores a ese inicio de fisura. El desarrollo de fisuras térmicas laterales puede, pero no necesariamente, indicar que las tensiones residuales protectoras de la llanta han sido neutralizadas o que han cambiado de signo como consecuencia del sobrecalentamiento anterior de la rueda.

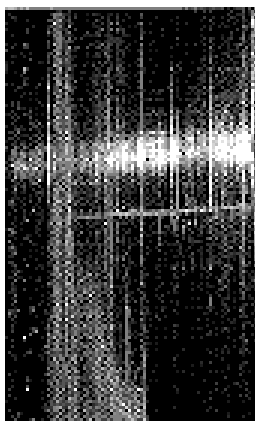


Figura 26. Fisura lateral térmica. Notar su alineación relativamente recta



Figura 27. Llanta completamente fisurada tras un sobrecalentamiento

El comienzo de las fisuras laterales térmicas no solo dependerá de la temperatura de la superficie de la banda de rodadura que se alcanza, si no también del gradiente térmico que existe en la llanta y el periodo de duración.



Figura 28. Llanta completamente fisurada con su fisura radial extendiéndose hacia el velo de la rueda

#### 4.2.2.13. MARCAS EN LA BANDA DE RODADURA. INDT

Las hendiduras o marcas en la banda de rodadura se originan por la existencia de cuerpos extraños en la cabeza de la vía.



Figura 29. Hendidura orientada longitudinalmente en la banda de rodadura.

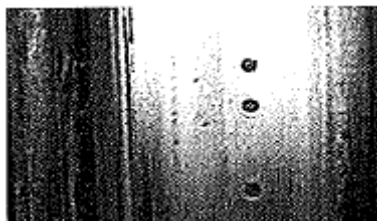


Figura 30. Marcas repetidas debido a cuerpos extraños presentes en la cabeza carril.



Figura 31. Arena induce este fenómeno en la banda de rodadura

En ocasiones, se ha sabido de la existencia de cuerpos extraños en las vías que han creado estas imperfecciones en las ruedas, colocados deliberadamente en la cabeza del carril como resultado de un acto de vandalismo.

En la mayoría de los casos este tipo de daño afecta sólo a la apariencia de la rueda, aunque si se exceden los límites expuestos en el manual de mantenimiento, entonces las ruedas afectadas deben ser reperfiladas.

Partículas de arena desde los sistemas de arena de a bordo para mejorar la tracción o frenado pueden también crear estas marcas en la banda de rodadura. El tamaño de las marcas será por tanto proporcional al tamaño de grano de la arena usada en la respectiva red, para diferenciar redes específicas o permitir el uso de diferentes tamaños de granos de arena. A veces el efecto de las marcas de la rueda por la arena tiene la apariencia de un “cielo estrellado”.

#### **4.2.2.14. DEFORMACIÓN DE LA PUNTA DE LA PESTAÑA.**

El tipo de daño de deformación del extremo de la pestaña, predomina en tranvías y vehículos ferroviarios ligeros que circulan con el extremo de la pestaña en el interior de raíles acanalados o por el paso de cruces y desvíos.

Irregularidades en los perfiles y cuerpos extraños junto con los raíles acanalados, pueden también dar origen al incremento de las presiones de contacto localizadas en el

extremo de la pestaña, que causan deformación plástica en dicha pestaña. Se pueden desarrollar por las cargas repetidas, o por choques del extremo de la pestaña. Los reperfilados de la banda de rodadura de la rueda restauran la rueda y la condición de la pestaña, aunque se necesitan medidas adicionales para prevenir que se repita tal efecto.



Figura 32. Pestaña con choques en su extremo



Figura 33. Pestaña con choques en su extremo

#### 4.2.2.15. DESPRENDIMIENTOS EN LA PESTAÑA.

Tipo de daño que afecta a tranvías y vehículos ferroviarios ligeros. Típicamente se origina por la existencia de una elevada presión de contacto de la pestaña de la rueda en contacto con el carril, el cual tiene una parte cortante que interacciona con la pestaña. En principio esta parte cortante del carril debe estar a una altura que garantice la no interacción con la pestaña, pero por posibles desgastes tanto en la rueda como en la cabeza del carril, la parte cortante se aproxima a la pestaña. También se forma tras circular con la punta de la pestaña por vías acanaladas (especialmente tranvías en cruces

y desvíos) con irregularidades localizadas o cuerpos extraños en las ranuras que causan un incremento de la presión de contacto en la base de la pestaña.

El reperfilado de la banda de rodadura de la rueda restaura la rueda y las condiciones de la pestaña aunque se deben tomar medidas adicionales para evitar que este tipo de daño se repita.

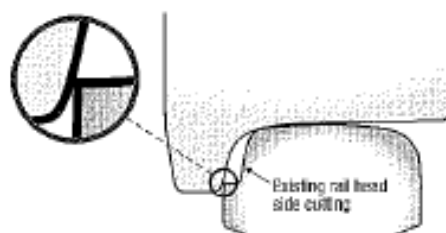


Figura 34. Representación esquemática de la interacción de la parte alta de la pestaña con un carril que tiene un nivel significativo de parte cortante

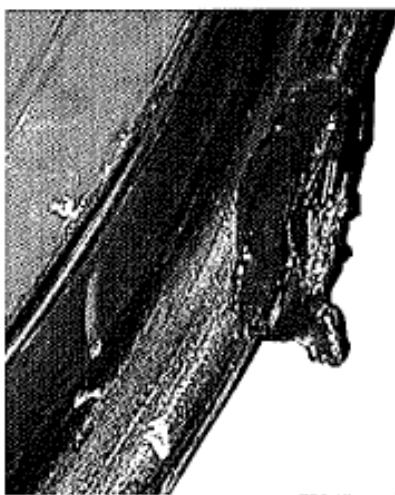


Figura 35. Pestaña afectada por este tipo de daño

#### 4.2.2.16. DEFECTOS EN EL VELO

Son fisuras circunferenciales que, partiendo de una zona defectuosa, se desarrollan por fatiga. Este tipo de fisuras pueden afectar a todo el espesor del velo y alcanzar grandes desarrollos circunferenciales, hasta producir la rotura brusca de la rueda. Estas zonas defectuosas pueden ser defectos metalúrgicos, pliegues de forja o laminación,

etc., capaces de generar una fisura bajo los grandes esfuerzos alternativos a los que se ve sometido el velo. También pueden producirse por entallas de mecanizado o por un diseño incorrecto (partes delgadas, taladros de equilibrado, radios de acuerdo cerrados, zonas de rugosidad elevada).

Las tensiones en servicio, como son las producidas en curvas, producen en el velo un fenómeno de fatiga. Hasta que la rueda se ha desgastado a sus dimensiones mínimas aceptables, el número de ciclos de carga puede haber sido del orden de  $10^9$ . El momento más peligroso desde el punto de vista de la fatiga, es el paso a máxima velocidad por la curva de radio más pequeño.

La zona de transición entre la llanta y el velo es una zona peligrosa, donde el momento de flexión alternado causa fisuras de fatiga en el interior de las ruedas. Otra zona peligrosa es la zona del velo próximo al eje donde los valores de resistencia a fractura, son los más pequeños en toda la rueda.

El desarrollo de fisuras se asocia a las altas tensiones a tracción generadas tras frenadas prolongadas y bajo la acción de altas cargas verticales y laterales.



Figura 36. Fisura circunferencial desarrollada en el velo de una rueda.



#### **4.2.2.17. DEFECTOS EN EL CUBO**

Generalmente se corresponden con fisuras de progresión axial producidas por defectos internos o aprietes excesivos durante la operación de calado. Este tipo de defecto no es muy común.

#### **4.2.3. MECANISMOS DE AGRIETAMIENTO DE RUEDAS DE TREN**

Como se ha indicado en el apartado anterior, en la mayoría de los distintos tipos de daño están implicadas las fisuras. Las fisuras en las ruedas son importantes por tres razones: una es la seguridad, debido al peligro de rotura de la rueda o al peligro de que parte de la pestaña o de la banda de rodadura se desprenda, otra es el confort, ya que las fisuras pueden llegar a desarrollar cavidades que producen altas vibraciones y empeoran el confort de los viajeros y por último, el consumo de la llanta, ya que, para eliminar todas las fisuras, se debe mecanizar la rueda.

Las fisuras pueden producirse por muchos motivos, aunque hoy en día no se entienden completamente todas las razones que las producen.

Las fisuras nacen a partir de defectos. Los defectos pueden ser de dos tipos:

- Defectos producidos durante la fabricación
- Defectos producidos durante el servicio y sujetos a observación en las labores de mantenimiento, estos defectos suelen ser del tipo fisuras de fatiga, defectos de corrosión o una combinación de ambos.

Cuando se inicia una fisura, bien debido a un proceso de fatiga o por una imperfección en el material original, es importante conocer bajo qué condiciones la fisura crece. Las fisuras crecen básicamente debido a la acción de los esfuerzos mecánicos, mientras que los esfuerzos térmicos juegan un papel importante en la nucleación de las mismas, en su crecimiento hasta alcanzar el valor umbral y en la generación de tensiones residuales.

La formación de fisuras y su propagación se debe principalmente a las tensiones de cortadura. En una rueda sujeta a contacto de rodadura pura la tensión de cortadura mayor se da entre los 3 y 5 mm por debajo de la superficie. Si además se aplica una





## **CAPÍTULO 4**

### **MANTENIMIENTO DE RUEDAS**

fuerza de fricción, como es la del frenado por zapata, ésta aumentará la tensión de cortadura en la superficie, dando lugar a dos zonas con una alta tensión de cortadura.

Es importante identificar las ruedas que contengan fisuras de fatiga antes de que se produzca una fractura rápida, especialmente en zonas con climas fríos, pues la resistencia a la fractura de los aceros en estas condiciones es menor. La magnitud de la carga, así como la geometría de contacto juegan un papel crucial en el crecimiento de las fisuras.

Para conseguir un estricto control sobre las fisuras en ruedas ferroviarias se debe determinar:

1. Tipo de defectos que se pueden producir y su posición. Uno de los principales problemas que se plantean es detectar las posibles zonas de desarrollo de fisuras a partir de dichos defectos. La principal dificultad, es que en las ruedas existen numerosas localizaciones en las que una fisura podría llegar a desarrollarse y además, dependen de muchos factores.
2. Modo de fallo esperado.
3. Vida útil a partir de la detección de una fisura.
4. Si el resultado del fallo será catastrófico o simplemente producirá pérdidas económicas (necesidad de reperfilear la rueda).
5. Tamaño de fisura crítico que produce rotura, dependiente de muchos factores. No existen normas que definan los tamaños mínimos admisibles. La Normativa Europea UIC 812-3, sustituida hace poco por la EN 13262, indica tamaño y posición de los defectos críticos para las ruedas nuevas (tras su fabricación). Existen numerosos estudios que tratan de calcular dicho tamaño de grieta crítica. Por ejemplo, en Estados Unidos, se utiliza como tamaño crítico de fisura el presentado en la siguiente tabla, donde este depende del material de la rueda (clase del material según normativa americana), del tipo de defecto y de la posición del mismo.





## CAPÍTULO 4 MANTENIMIENTO DE RUEDAS

Clase del material	Grietas térmicas (mm)		Otras grietas en llanta (mm)	
	Grietas en esquinas	Grietas superficiales	Tamaño de grieta	Profundidad de grieta
A	6,35	16,51	12,70	2,13
B	3,56	9,14	6,35	1,09
C	2,54	6,60	4,06	0,71
U	2,54	6,60	4,06	0,71

Tabla 1. Tamaños de grieta crítico con una tensión aplicada de 378.95 MPa.

Según Lundén, el riesgo de inicio de una fisura por fatiga de contacto se concentra en un volumen de material que comienza en la banda de rodadura y llega a una profundidad de unos 6 mm. Este mismo estudio muestra que, con un defecto de hasta 1 mm a una profundidad de hasta 10 mm, el defecto no es peligroso, independientemente de su localización y orientación. Bajo esos 10 mm Lundén demuestra que se podrían aceptar defectos de hasta 2 mm.

Marais, tras sus investigaciones con ruedas de mercancías, define que defectos con un área mayor de 200 mm<sup>2</sup> producen rotura y que defectos en la llanta con una longitud mayor de 5 mm son inaceptables.

6. El número de inspecciones a realizar a lo largo de la vida de la rueda.

Las ruedas que son más propicias a la aparición de fisuras son aquellas que han sufrido un sobrecalentamiento como consecuencia de una frenada prolongada, debido a que las fuerzas de compresión residuales conseguidas tras el tratamiento térmico durante su fabricación se transforman en tensiones de tracción, que ayudan a la iniciación y propagación de las fisuras.

De todos los defectos detectados en las ruedas ferroviarias, se destacan las fisuras que pueden existir a distintas profundidades en la banda de rodadura, como son las superficiales, subsuperficiales y las internas.

### 4.2.3.1. FISURAS SUPERFICIALES (“SPALLING”)

Son fisuras que se propagan hacia el interior de la llanta, llegando a producir pequeños desprendimientos de material. Estas fisuras se producen por el deslizamiento de las ruedas o por la acumulación de deformación plástica en la superficie de rodadura.

#### 4.2.3.1.1. FISURAS SUPERFICIALES PRODUCIDAS POR DESLIZAMIENTO DE RUEDAS

La fricción entre rueda y carril introduce una alta carga térmica local en la banda de rodadura, llegando hasta temperaturas próximas a los 800°C. A esta temperatura disminuye el límite elástico en esa zona, pudiendo aparecer deformación plástica. Cuando la rueda vuelva a girar se produce un rápido enfriamiento, produciéndose una transformación de fase en la banda de rodadura, formándose martensita.

La martensita es frágil, con una estructura cristalina que tiene un coeficiente de expansión volumétrico de un 0.5% comparado con la estructura perlítica a temperatura ambiente. Debido a la citada expansión, se producen tensiones residuales compresivas en la estructura martensítica y tensiones residuales de tracción en el material de alrededor. Si la rueda con planos sigue en servicio o si la zona afectada por el calor no se elimina por mecanizado, se formarán grietas de fatiga por la acción de las tensiones de contacto de rodadura. La resistencia a la propagación de fisuras en la martensita es prácticamente nula, sin embargo no es seguro que las fisuras continúen propagándose una vez entran en el material base. Se produce deformación superficial y se forman grietas en el área de contacto entre la pequeña capa de martensita y la zona que la rodea de perlita. Mientras la rueda se mueva se favorece el crecimiento de grietas.

Una vez que las fisuras crecen, se empieza a producir desprendimiento de pequeños trozos de material, haciendo que de nuevo aumente el nivel de impacto. Las cavidades producidas son del orden de entre 1 y 5 mm de profundidad, rodeadas de fisuras con profundidades de hasta 10 y 18 mm bajo la banda de rodadura.

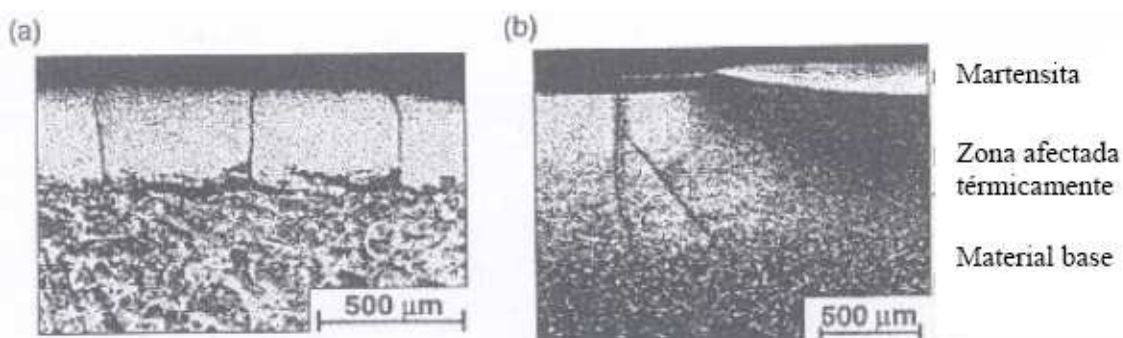


Figura 37. Zona afecta por el calor y desarrollo de grietas en la misma. En la figura a) la zona afecta por el calor está claramente diferenciada del material base, mientras que en b) la capa de martensita no está tan claramente diferenciada.



#### **4.2.3.1.2. FISURAS SUPERFICIALES PRODUCIDAS POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA SUPERFICIE DE LA BANDA DE RODADURA (RACHETTING)**

Cuando la carga está por encima del límite elástico de la rueda, se produce flujo plástico, produciéndose tensiones residuales y endureciéndose el material por deformación. El fallo ocurre por ciclo de fatiga de baja frecuencia, tratándose de un fenómeno que ocurre cerca de la superficie de rodadura y su principal causa son las altas fuerzas de fricción.

Cuando la ductibilidad de la superficie del material está agotada se desarrolla una grieta que suele orientarse perpendicularmente a la dirección de deslizamiento. La deformación produce fisuras que se inician en el material y se propagan a lo largo de los granos deformados plásticamente, propagándose inicialmente en la superficie con un ángulo poco profundo, para seguir una dirección axial. Por último suelen desviarse en dirección circunferencial, con una profundidad entre 1.5 y 2 mm, produciéndose la rotura final cuando una parte de la fisura llega a la superficie, desprendiéndose una parte de la banda de rodadura.

#### **4.2.3.2. FISURAS SUBSUPERFICIALES. EXFOLIACIONES (“SHELLING”)**

La rotura de la banda de rodadura por fatiga, producida por el defecto conocido como “shelling”, es uno de los defectos de ruedas más comunes. Este defecto está asociado a altas cargas y bajos niveles de deslizamiento, produciéndose la pérdida de material causada por RCF. Durante el ciclo de contacto el daño subsuperficial se acumula dando lugar a pequeñas grietas horizontales. Bajo ciclos de carga estas grietas se propagan bajo la superficie hasta que el campo de tensiones hace que la grieta cambie de dirección hacia la superficie.

Se caracteriza por tener forma de anillo, paralelo a la superficie de rodadura. Se trata de defectos producidos por fatiga y crecimiento de grietas cerca de la banda de rodadura, a una profundidad de unos pocos milímetros, alrededor de unos 6 mm. Se supone que las fisuras se inician a una profundidad de entre los 4 y los 5 mm, propagándose hasta una profundidad de unos 20 mm, desviándose a esta profundidad en una fisura circunferencial, observándose grietas de entre 15 y 300 mm antes de la rotura del material.



## **CAPÍTULO 4**

### **MANTENIMIENTO DE RUEDAS**

Los principales puntos de nucleación de grietas son los bordes de la interfase ferrita-perlita y las inclusiones no metálicas. En la interfase ferrita-perlita se revelan microgrietas.

El proceso depende del material y de las condiciones de operación, pero en todos los casos se manifiesta por el inicio y propagación de fisuras en capas próximas a la superficie hasta formar desprendimientos que dan lugar a agujeros. El inicio de las grietas a fatiga se asocia con la deformación local cíclica y plástica. Una vez que las fisuras se forman, se propagan rápidamente, aparentemente paralelas a la superficie, a la profundidad de la mayor tensión de contacto de cortadura.

Este tipo de defecto puede ser muy peligroso ya que produce el desarrollo de fisuras que crecen circunferencialmente, pudiendo llegar a desprender secciones importantes de material. Las malas condiciones del carril, cargas y velocidades excesivas, dureza de la rueda insuficiente, ruedas demasiado pequeñas para la carga a sostener, son factores que contribuyen a la formación de “shelling”, predominando este tipo de daño en ruedas frenadas por discos.

Las ruedas con “shelling” y “spalling” experimentan mayores cargas de impacto como consecuencia del golpeteo de las ruedas ovaladas que aceleran el inicio y propagación de las fisuras, además de poder provocar daño a diferentes elementos del tren, como los rodamientos o las suspensiones.

En la siguiente tabla se muestra el total de ruedas retiradas de servicio entre 1985 y 1996 en Estados Unidos para trenes de mercancías con el freno aplicado directamente sobre la llanta. Destacar el aumento producido en los últimos años de los casos de “shelling”.



## CAPÍTULO 4 MANTENIMIENTO DE RUEDAS

Motivo de la retirada	Número de ruedas retiradas											
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
66 Pestaña agrietada o rota	945	823	543	526	444	495	436	280	274	269	233	176
68 Llanta agrietada o rota	2439	2302	2895	3241	1740	9036	1418	1181	1013	1091	751	545
71 Llanta con "spalling"	528	474	343	312	289	371	320	295	276	258	185	169
74 Grietas térmicas	1856	1181	1407	3125	6834	8586	10951	8277	5533	7725	7205	8363
75 Llanta con "shelling"	33298	34389	29722	32898	37243	39058	44955	49592	60514	67195	71408	79862
83 Velo agrietado o roto	180	170	182	163	166	155	141	78	72	68	35	55

Tabla 2. Número de ruedas retiradas de servicio según la AAR (Association of American Railroads) entre los años 1985 y 1996 clasificadas según el motivo de retirada.

### 4.2.3.3. FISURAS INTERNAS POR INCLUSIONES PROFUNDAS ("SHATTERING")

Este modo de fallo, normalmente provocado por inclusiones internas situadas en zonas de contacto sometidas a altas tensiones, puede provocar pérdida de material de la llanta y pestaña. Estos defectos causan un alto incremento local en las tensiones y deformaciones.

En la práctica ningún material está libre de defectos y sus efectos dependen de su tamaño, forma y orientación. Las fisuras "shattering" se inician por inclusiones de óxido de aluminio en las ruedas forjadas. Las inclusiones de alúmina pueden tener varios orígenes: productos de desoxidación que no desaparecen durante el fundido, reoxidación durante el vertido del lingote o trozos de material cerámico del horno o de los cucharones refractarios.

La pureza de los aceros usados en el ferrocarril ha sido una de las mejoras destacables en lo que concierne a los proveedores de ruedas, especialmente con el incremento de velocidades en Europa. Se han incorporado medidas de pureza, así como muchos métodos de END (ensayos no destructivos) para evitar ruedas con "shattering"

en servicio. La medida de pureza, así como los END se realizan después del tratamiento térmico y del mecanizado de las ruedas.

Estos defectos se propagan normalmente paralelos a la banda de rodadura hacia el exterior de la misma, antes que propagarse hacia el interior de la rueda. Una vez la fisura se ha iniciado, la propagación es rápida bajo las condiciones normales de carga de la rueda. Sin embargo para que se inicie la fisura es necesario que se produzca una gran carga, como un impacto.



Figura 38. Fallo en rueda por “shattering”.

La mayoría de las ruedas afectadas por este tipo de daño, son ruedas relativamente nuevas, habiendo también un pico para ruedas próximas al fin de su vida, esto sugiere que la mayoría de las llantas con “shattering” tienen fallos de mortalidad infantil, que ocurren principalmente debido a un hueco o una inclusión de tamaño crítico que causa el inicio de la fisura. También cuando la rueda sufre fuertes impactos y la llanta tiene una inclusión de menor tamaño, se puede formar una fisura. Tras uno o varios reperfilados y vuelta al servicio, la fisura continuará creciendo convirtiéndose en daño “shattering”. Esto explica el que aparezcan también ruedas con este tipo de daño casi al final de la vida de la rueda.

Se cree que las inclusiones de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) son las causantes del inicio de estas fisuras en las ruedas forjadas, ya que en el origen de las grietas se han encontrado este tipo de inclusiones. El tamaño de estos defectos es de 1 a 5 mm y el ancho entre 0.3 y 1 mm. Este tipo de fallos suele aparecer en los trenes de alta velocidad después de reperfilado una rueda desgastada, siendo entonces la profundidad típica entre 10 y 15 mm.

El área de interés para este tipo de delaminaciones suele ser una banda entre 60 y 70 mm de la cara externa de la rueda comenzando por la zona plana.

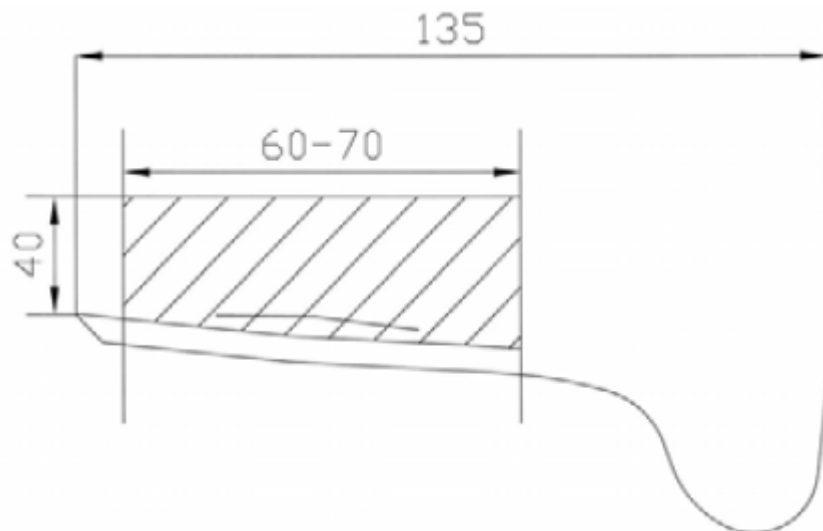


Figura 39. Zona de localización de fisuras circunferenciales en la llanta (medidas en mm).

#### 4.2.3.4. FISURAS TÉRMICAS

Son fisuras muy peligrosas para las ruedas, frecuentes en vagones de mercancías donde los frenos se aplican directamente sobre la banda de rodadura. Se deben a frenadas anormales, a la introducción de un flujo de calor en zonas de pequeña sección de la llanta o a la fricción de materiales que son agresivos al acero.

Estas fisuras se originan por fatiga como consecuencia del resultado de distintos ciclos térmicos. Tras su origen, se propagan en dirección axial si existe un campo de tensiones de tracción, hasta el momento en que se produce la fractura frágil, donde se produce el crecimiento inestable de la grieta que provoca la rotura catastrófica de la rueda. Otra posibilidad es que estas fisuras, originadas en la superficie como fisuras axiales, se desvíen bajo la influencia de las cargas mecánicas en grietas circunferenciales.

Para las ruedas europeas, que son ruedas forjadas, las fisuras térmicas aparecen con más frecuencia en la banda de rodadura, en las proximidades de la cara externa. Sin embargo, para las ruedas americanas (ruedas coladas) es más frecuente encontrar este tipo de grietas en las proximidades de la pestaña.

En el caso de vehículos ferroviarios, donde los frenos se aplican sobre discos de freno, las fisuras térmicas pueden aparecer debido a un deslizamiento de las ruedas, ya sea por la diferencia en la velocidad de giro de las ruedas respecto al carril, o por estar éstas desalineadas o desplazadas con respecto al centro de la vía.

La posición típica de este tipo de defecto es la que se muestra en la siguiente figura. De las dos posiciones indicadas, la posición en la esquina es la más peligrosa, ya que puede producir que la rueda se abra. Se suele utilizar como referencia una entalla en la esquina a una profundidad de 5 mm.

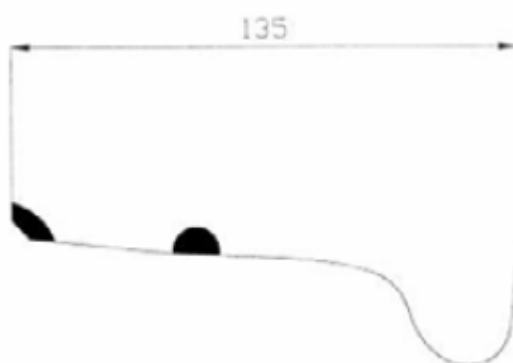


Figura 40. Zona de localización de fisuras térmicas en la llanta (medidas en mm).

#### 4.2.4. PAUTAS A SEGUIR

Cuando hay que valorar daños en ruedas o sus efectos, es necesario precisar de forma clara el caso, para permitir que el tema sea definido y dirigido correctamente. Por tanto se sugiere que siempre que se observe daño en una rueda, su efecto debe ser dictaminado con una valoración de expertos teniendo en cuenta las siguientes pautas.

La siguiente información siempre se debe recoger junto con una valoración de la clasificación del daño:

- Vehículo Tipo/Clase
- Ruta de operación
- Fecha
- Unidad de tren o número de vehículo
- Posición y parte del bogie
- Kilometraje del bogie desde su instalación y/o último reperfilado



- Descripción de la rueda dañada junto con los códigos Why apropiados donde sea posible
- Para daños en ruedas CLUS o FLT es necesaria una valoración clara de la rueda compañera del mismo bogie para la misma posición angular, ayudando así a confirmar el tipo de daño
- Una valoración de la condición de las otras ruedas dentro del mismo bogie/vehículo

Cuando se toman fotografías de ruedas dañadas, hay que tener en cuenta la elevada reflexión natural de un perfil de rueda limpio, y tomarlas con buena luz ambiente. La fotografía debe cubrir la anchura completa de la banda de rodadura de la rueda, incluyendo la pestaña y la parte del chaflán. La rueda debe estar localmente lavada antes de empezar a ser fotografiada (usando un paño; no se debe usar ninguna lija ya que raya la superficie) y también indicar que superficies afectadas por la corrosión pueden ocultar posibles daños.

Para identificar correctamente la fotografía, una buena práctica es marcar la siguiente información directamente en la banda de rodadura antes de tomar la fotografía:

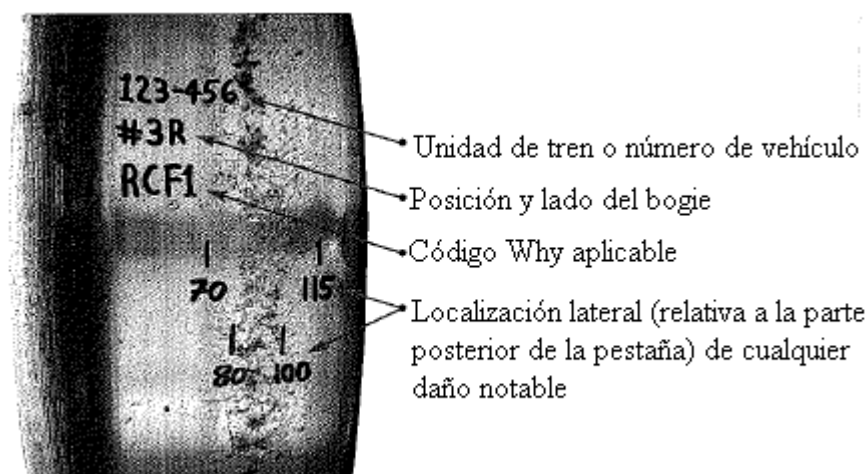


Figura 41. Información marcada en la banda de rodadura para hacer la fotografía.



### **4.3. PREDICCIÓN DE VIDA DE INICIO POR FISURAS POR FATIGA EN RUEDAS FERROVIARIAS**

En este apartado se incluye un estudio sobre la predicción de vida de inicio de fisuras por fatiga en ruedas ferroviarias ya existente [46]. Se incluye en el proyecto presente ya que puede formar parte dentro de un plan eficiente de mantenimiento, aportando información muy valiosa que afecta a la seguridad ferroviaria.

#### **4.3.1. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS EN EL CONTACTO RUEDA-CARRIL**

Las ruedas ferroviarias están normalmente montadas de manera rígida sobre un eje de acero. Debido a las elevadas cargas en el eje y la pequeña área de contacto rueda-carril, las tensiones en dicha área de contacto son muy elevadas. Para vencer las limitaciones de las propuestas tradicionales para el problema del contacto rueda-carril, es necesario un modelo de elementos finitos 3D elasto-plástico. Se propone una metodología de simulación para el análisis del contacto rueda-carril. Este es un modelo de elementos finitos en 3D realista y puede calcular con certeza la respuesta tensional en 3D de la región de contacto, incluye tanto material como geometría no lineal. Puede ser usado para simular movimientos de la rueda largos y complejos, tales como rotación, deslizamiento, movimiento de lazo e incluso respuesta ante impactos dinámicos.

A través de técnicas de submodelado, el modelo propuesto es muy eficiente en cuanto a requerimientos de cálculo y hardware necesarios, ya que puede ahorrar por encima de 100 veces el tiempo de cálculo empleado con el modelo de elementos finitos sin usar técnicas de submodelado, para el mismo nivel de exactitud en los resultados.

Para un análisis preciso en la zona de contacto, la geometría de los perfiles de la cabeza de los carriles y de la banda de rodadura es muy importante. Debido al desgaste, la cabeza de los carriles y la banda de rodadura cambiará con el tiempo. Para ruedas y carriles relativamente nuevos, se pueden usar directamente las medidas de perfiles de fabricación, en vez de medidas de campo.

En primer lugar se construye el modelo geométrico tanto de la rueda como del carril, correspondiendo este modelo con el llamado modelo completo. La longitud del carril es la misma que la existente entre dos traviesas. Las condiciones de contorno fijadas son aplicadas a las dos terminaciones del carril. Se utilizan diferentes mallados en el modelo completo usando elementos 3D (SOLID 45 en ANSYS). En la región de

contacto, se usa un mallado más fino. Para el centro de la rueda, se ha conectado un punto piloto a la rueda usando algunos elementos de conexión rígidos. Todas las cargas externas y condiciones de contorno de la rueda se aplican en el punto piloto. Esas cargas y condiciones de contorno pueden ser obtenidas a través de las medidas de campo o desde una simulación numérica del análisis del movimiento del tren. En las posibles áreas de contacto de la cabeza del carril y de la banda de rodadura, se usan elementos de contacto (CONTACT 174 y TARGET 170 en ANSYS), correspondientes al mallado de la geometría de la rueda. El efecto de la fricción está incluido dentro de las propiedades del material del elemento de contacto. Se usa el modelo de fricción de Coulomb en ANSYS. Los coeficientes de fricción pueden ser calibrados usando datos de medidas de campo. Las propiedades del material de la rueda y carril se describen usando un modelo de endurecimiento cinemático bilineal en ANSYS. El modelo de elementos finitos se muestra en la figura 42.

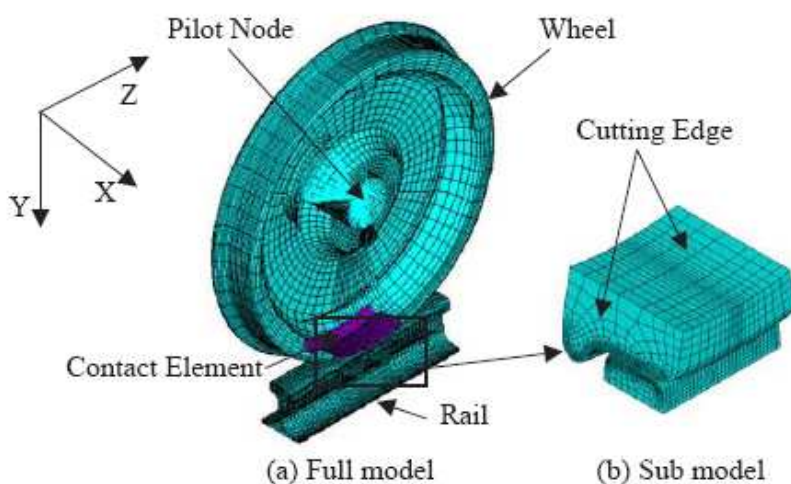


Figura 42. Modelo de elementos finitos del contacto rueda-carril.

Lo siguiente, es efectuar el análisis cuasiestático para el modelo completo y almacenar los resultados para cada paso. De esta manera se realiza un corte en la región de contacto extrayéndolo fuera siendo este el submodelo. El tamaño del submodelo depende de los objetivos del análisis y también del movimiento de la rueda simulado. Los mismos tipos de elementos utilizados en el análisis del modelo completo se usan para mallar el submodelo. Un mallado muy fino se aplica al área de contacto y bajo cierta profundidad en la superficie de contacto. Los resultados del modelo completo son interpolados al submodelo correspondientes a los diferentes pasos calculados, y los resultados de la interpolación son aplicados como condiciones de contorno para el submodelo. En el submodelo, hay que tener presente que la sección de corte debe estar lo suficientemente lejos de zonas de concentración de tensiones, en nuestro caso dicha

zona sería la región de contacto. Los resultados en el submodelo se obtienen usando un mallado fino. Éstos no tienen por qué coincidir con los resultados del mallado grueso obtenidos en el modelo completo. Las diferencias en los resultados pueden deberse no solo por las diferencias en el mallado, si no también debido a no linealidades en la geometría y material alrededor de la región de contacto. Los resultados de la sección cortada del submodelo se comparan con los resultados en el modelo completo. Si la diferencia es lo suficientemente pequeña, se extraen los resultados en el submodelo para futuros análisis a fatiga. Si no, hay que cambiar el submodelo y repetir los pasos previos. El organigrama del modelo de elementos finitos se muestra en la figura 43.

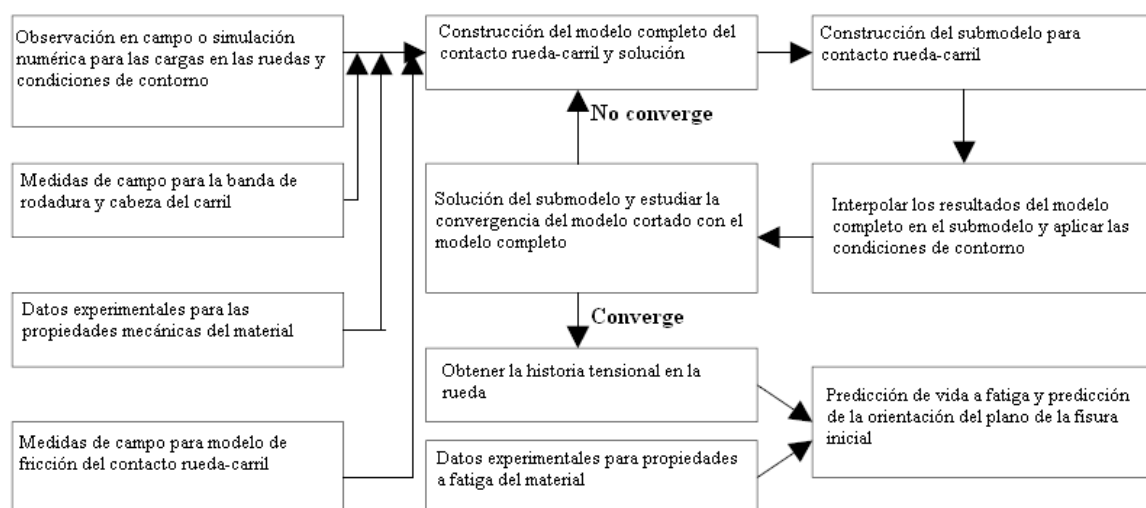


Figura 43. Metodología del modelo de elementos finitos.

#### 4.3.2. EJEMPLO NUMÉRICO

El perfil de rueda se elige acorde a la AAR [32]. El diámetro de la rueda es 0.838 m. Los detalles de la geometría de la superficie de la banda de rodadura se muestra en la norma AAR M107/208. La carga vertical se asume ser la máxima de diseño, la cual es de 146.2 KN. Las propiedades del material del carril y rueda son las mismas (un límite elástico de 500 MPa, Módulo de Young de 205 MPa, coeficiente de fricción de 0.3). La longitud del carril es de 600 mm, que es normalmente la longitud entre dos traviesas, considerando como punto de contacto inicial el situado en el centro tanto de la banda rodadura como de la cabeza del carril.

Si solo se consideran no linealidades en el material, el componente llega al estado estable después del primer ciclo. Sin embargo, si también se considera no linealidad en la geometría del problema de contacto rodante, el componente probablemente alcanza el estado estable después de los primeros ciclos de carga. Bajo cargas cíclicas de fatiga, es importante usar la respuesta tensional del estado estable dentro de los componentes mecánicos. Ésta solo requiere unos pocos ciclos rodantes del móvil para llegar al estado estable. Se supone que el estado estable se alcanza después de seis ciclos para un modelo de elementos finitos de 2D [33]. Para equilibrar el esfuerzo de cálculo y la exactitud del análisis para el estudio del modelo de elementos finitos de 3D, se supone que la respuesta tensional después de dos ciclos tiene valores estables y se usan para la predicción de vida a fatiga.

El análisis de carga estática del contacto rueda-carril se realiza primero. Los resultados del submodelo se representan en las figuras 44 y 45. La figura 44 muestra las tensiones de Von Mises en dos secciones de corte diferentes. La figura 45 muestra tensiones a cortadura también en dos secciones diferentes ( $\tau_{xy}$  y  $\tau_{yz}$ ). De la figura 44 se observa que la tensión máxima de Von Mises se da bajo cierta profundidad de la banda de rodadura. La tensión disminuye rápidamente según aumenta la profundidad. La elevada tensión solo se produce dentro de una pequeña región en el lugar del contacto rueda-carril. La tensión en las otras partes del modelo es casi cero.

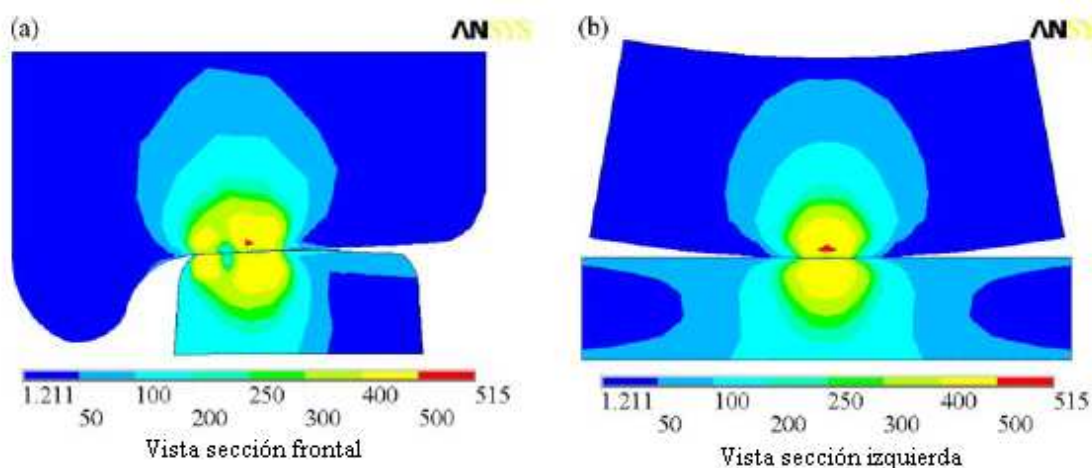


Figura 44. Distribución de tensiones Von Mises del contacto rueda-carril

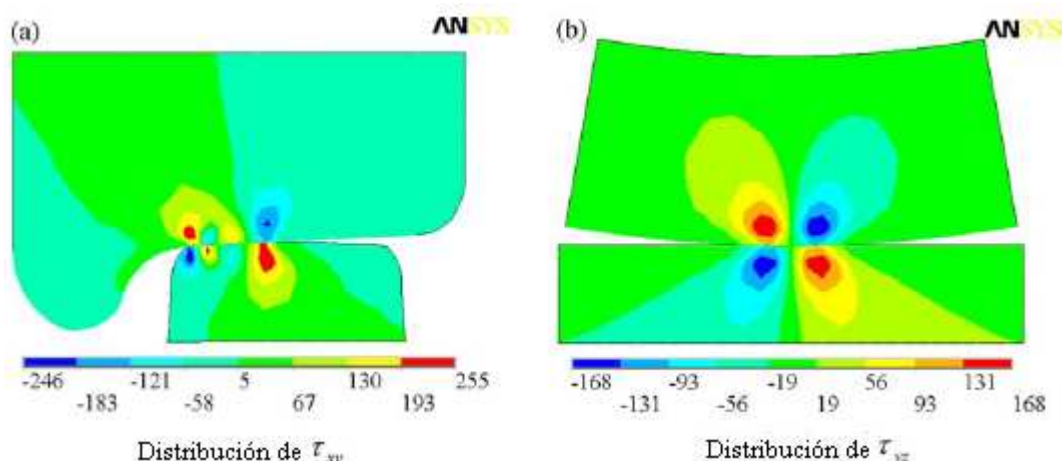


Figura 45. Distribución de tensiones de cortadura para el contacto rueda-carril.

De la figura 45, se observa un modelo de mariposa para la tensión a cortadura  $\tau_{yz}$ . El valor máximo también se produce para una profundidad de aproximadamente 5 mm bajo la banda de rodadura. A diferencia de la tensión máxima de Von Mises que se da justo sobre la zona de contacto, las tensiones máximas a cortadura ocurren en localizaciones a cierta distancia de la zona de contacto. De las figuras 44(a) y 45(a), el modelo de tensión indica múltiples puntos de contacto entre la rueda y el carril. La presión y área de contacto en la banda de rodadura se representa en la figura 46. Se observan dos puntos de contacto: uno es cercano al centro de la superficie plana de la banda de rodadura y la otra cerca del radio de acuerdo entre banda de rodadura y pestaña.

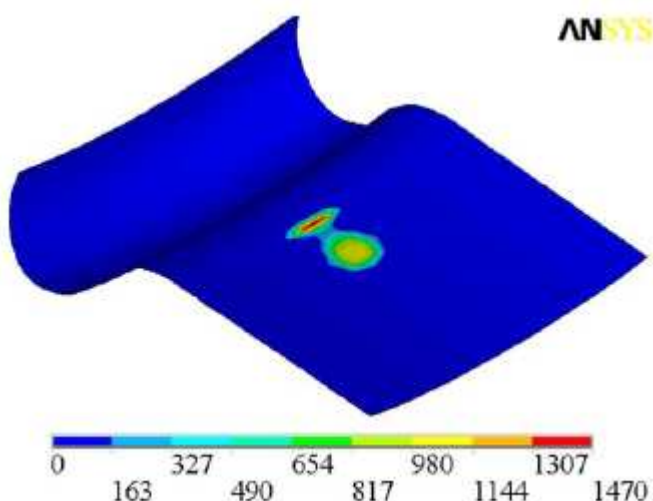


Figura 46. Distribución de presiones en el contacto en la banda de rodadura.

Después de realizar el análisis estático, se simula la rotación de la rueda en el carril, el cual es el modo de movimiento habitual de la rueda. Esto se consigue por la



aplicación de las condiciones de contorno propias en el nodo piloto del modelo completo. En la teoría de ANSYS se encuentran los detalles sobre el control del movimiento en el análisis del contacto. En la figura 47 se muestra la historia tensional durante media revolución de la rueda en dos puntos (uno está 3 mm por debajo de la superficie de rodadura y el otro 10 mm por debajo de la misma). El eje x no indica el tiempo real, si no el paso del tiempo en el análisis de elementos finitos durante la simulación del movimiento de rotación. La figura 47 muestra que las tensiones en la rueda bajo condiciones de contacto rodante no son proporcionales, lo cual indica que la tensión máxima normal y la tensión máxima de cortadura no ocurren simultáneamente. El valor de la tensión normal disminuye desde la profundidad de 3 a 10 mm. Los resultados del FEA solo muestran unas pequeñas tensiones residuales para las dos localizaciones, que apenas se pueden ver en la figura 47 y sus efectos son insignificantes para el presente estudio.

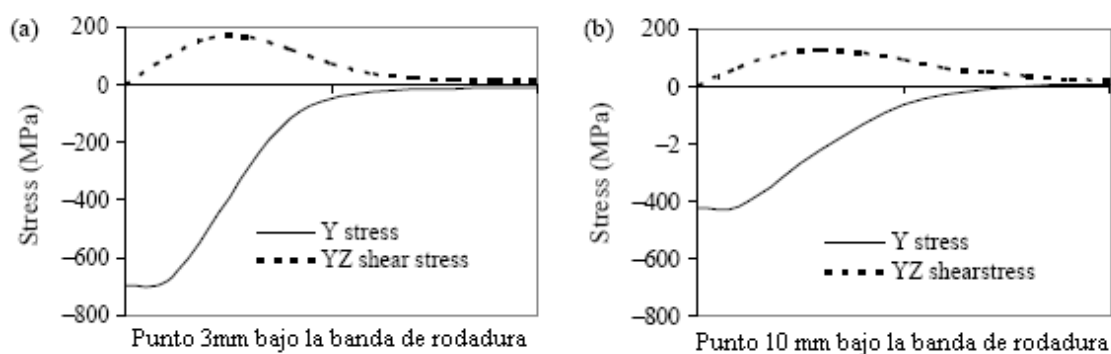


Figura 47. Historia tensional para dos localizaciones en la rueda

Después de obtener las tensiones de la rueda, el criterio de fatiga multiaxial propuesto se usa para calcular la vida de inicio a fatiga y la orientación del plano crítico. Debido a que no se sabe la localización crítica, se exploran todos los posibles nodos en la sección radial. La curva de fatiga S-N para cargas uniaxiales y de torsión se representa en la figura 48. En este estudio, la curva S-N se usa solo para demostrar la metodología. En la implementación práctica, sería deseable usar propiedades del material que representen las condiciones existentes en servicio. La distribución de daño por fatiga, la orientación del plano de la fisura inicial y la observación en campo de una rueda con fallo se representan en la figura 49. Hay que indicar que la comparación presente es cualitativa. La comparación cuantitativa necesita experimentos caros y observaciones en el lugar.

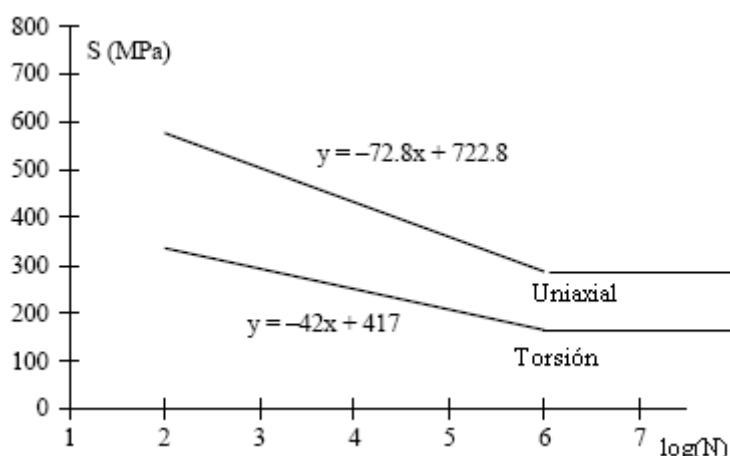


Figura 48. Curva S-N para carga uniaxial y de torsión

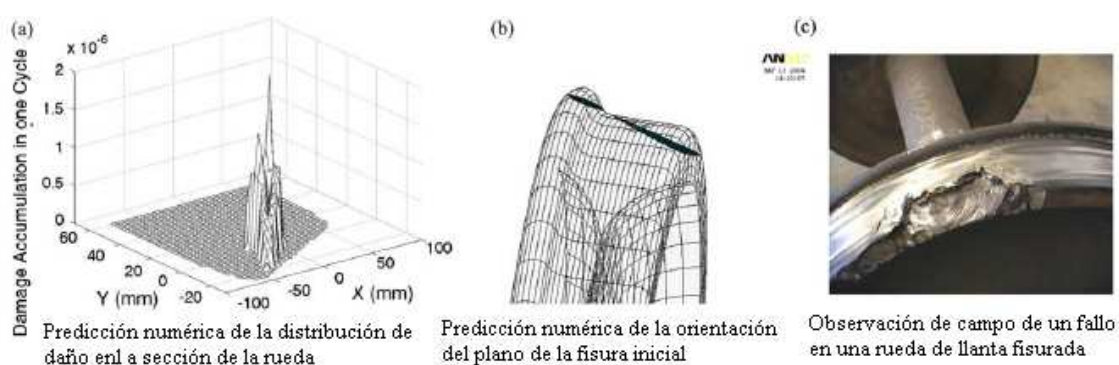


Figura 49. Simulación numérica y observación en campo de fallo en llanta fisurada de rueda ferroviaria.

Distintas conclusiones se pueden obtener tanto de las predicciones numéricas como de las observaciones experimentales. De las observaciones de campo, las fisuras de fatiga normalmente se inician a una profundidad de 5-20 mm bajo la superficie de rodadura. Las localizaciones numéricas de inicio de fisuras se obtienen chequeando cada punto del material para el daño máximo. Para el estudio presente, este es el punto que está 5 mm bajo la región de contacto. Una posible conclusión de este análisis sería que se obtienen valores bajos del rango debido a que no se consideran inclusiones. Diversos estudios existentes [34] afirman que hasta una profundidad de 10 mm no se encuentran inclusiones en llantas fisuradas, e inclusiones macroscópicas se encuentran en fallos situados a una profundidad de entre 10 y 20 mm. El ángulo existente entre el plano de la fisura inicial por fatiga y la superficie de la banda de rodadura de la rueda es bajo. En el ejemplo numérico tratado, es de unos  $20^\circ$ . Notar que este análisis usa cargas



constantes para condiciones de trabajo normales (máxima carga de diseño para ruedas) y no incluye los efectos de los defectos iniciales. Además el estudio necesita incluir cargas variables y defectos iniciales en las condiciones de servicio.

#### 4.3.3. ESTUDIOS PARAMÉTRICOS

En esta sección, se estudia la influencia de distintos factores en el daño por fatiga de las ruedas, usando modelos de elementos finitos y de fatiga multiaxial desarrollados en las secciones previas.

##### 4.3.3.1. DIÁMETRO DE LA RUEDA

El diámetro de la rueda afectará al daño por fatiga. Una explicación muy sencilla es que el radio de la rueda afectará a las tensiones internas en la rueda según la teoría de Hertz. Sin embargo, para análisis de contacto no lineal y análisis de fatiga multiaxial, la relación entre vida a fatiga y diámetro de la rueda necesita estudiarse más detenidamente. Se usan un conjunto de simulaciones numéricas de ruedas con diferentes diámetros, desde 0.711 a 1.168 m [32]. La carga vertical usada es la correspondiente a la máxima de diseño para la rueda de 0.838 m. La tasa de acumulación de daño (daño por ciclo para carga de amplitud constante) para diferentes tamaños de rueda se representa en la figura 50.

De la figura 50, se observa que la tasa de acumulación de daño desciende según crece el diámetro de la rueda. El efecto es más significativo para ruedas de tamaño menor (diámetro de rueda menor de 0.838 m). Notar que para ruedas de 0.914 m, la tasa de acumulación de daño muestra un incremento local.

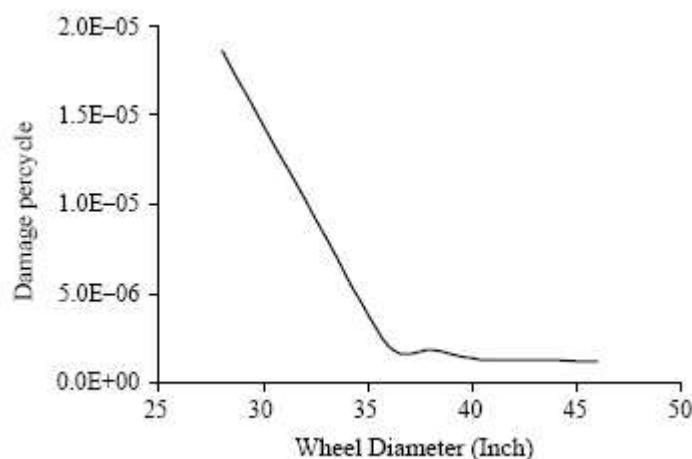


Figura 50. Relación entre la tasa de acumulación de daño y el diámetro de la rueda

#### 4.3.3.2. CARGAS VERTICALES

La tasa de acumulación de daño en la sección de la rueda de 0.914 m bajo diferentes cargas verticales (64 KN, 96 KN, 128 KN, 160 KN y 192 KN) se calcula y representa en la figura 51. Como es de esperar, la tasa de acumulación de daño crece según aumenta la carga vertical. En este caso, la amplitud de la tensión equivalente es menor que el límite resistente del material para cargas verticales menores de 105 KN.

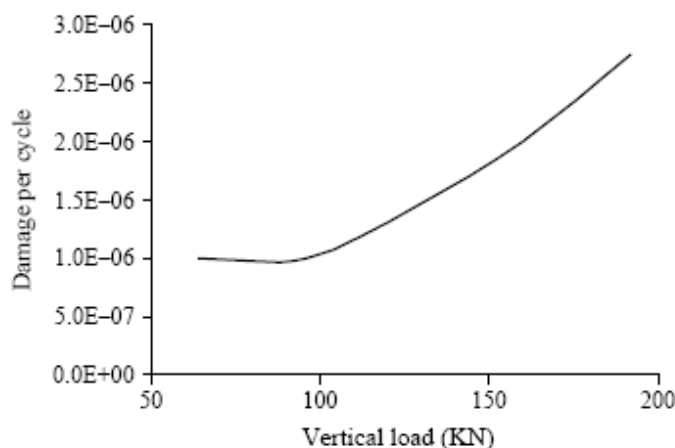


Figura 51. Relación entre la tasa de acumulación de daño y la carga vertical

#### 4.3.3.3. DUREZA DEL MATERIAL

Para el problema de contacto rodante, tanto para rueda-carril como para mecanismos, la dureza es un parámetro del material muy importante; ésta afecta directamente a la rigidez en el contacto y por tanto a la respuesta tensional en la rueda [32].

Dureza y resistencia están relacionados el uno con el otro: la resistencia aumenta según aumenta la dureza. Existen fórmulas empíricas [35] que relacionan la dureza y la resistencia última para una gran variedad de metales. Generalmente la relación de dureza y resistencia también depende de los diferentes materiales. Hay dos colecciones de datos experimentales [36, 37] para ruedas ferroviarias que se usan para relacionar la dureza con el límite elástico. Los datos experimentales y la regresión lineal se representan en la figura 52.

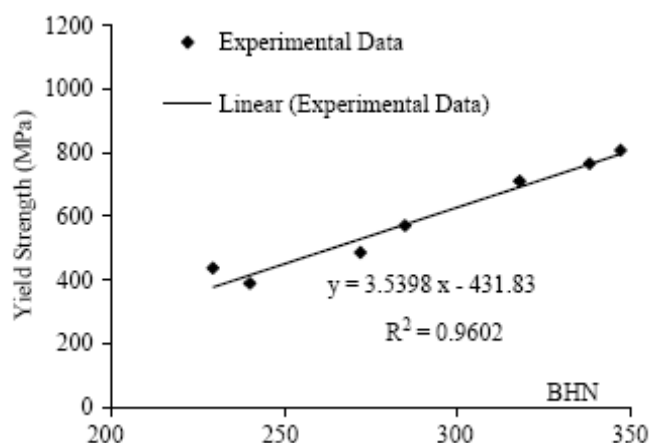


Figura 52. Relación entre dureza y límite elástico para materiales de ruedas.

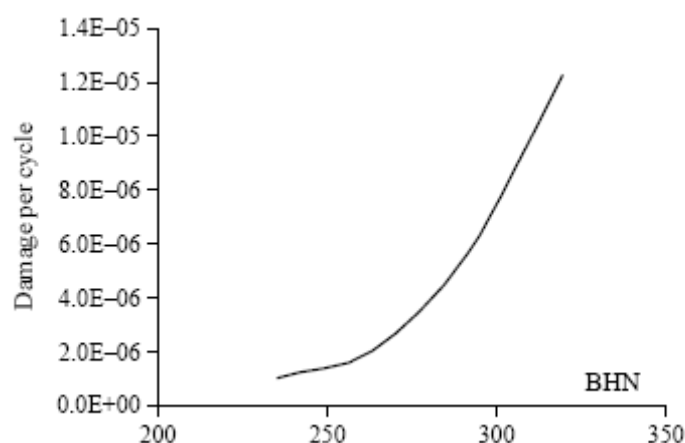


Figura 53. Relación entre dureza y tasa de acumulación de daño en ruedas.

De la figura 52, se observa una relación positiva lineal entre dureza y límite elástico. En el estudio actual, se usan diferentes límites elásticos en el modelo de elementos finitos para diferentes durezas usando una función de regresión lineal como se muestra en la figura 52. Siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 3.3.3.2, la tasa de acumulación de daño para diferentes durezas de materiales se calculan y representa en la figura 53.

De la figura 53, se ve que la tasa de acumulación de daño crece según aumenta la dureza del material. Este se debe, a que para materiales con elevada dureza, es difícil que se produzcan deformaciones plásticas locales en la superficie de contacto y por tanto se obtiene un área de contacto pequeña entre rueda y carril. Por tanto se obtiene

una presión elevada en el contacto para materiales con elevada dureza bajo las mismas cargas verticales. Esto conduce a una tensión muy elevada en las ruedas ferroviarias.

#### 4.3.3.4. RESISTENCIA A FATIGA

En este apartado se estudian los efectos del límite resistente del material en el daño de ruedas ferroviarias. En el modelo de fatiga multiaxial, se usan dos propiedades del material: la resistencia a fatiga uniaxial y la tasa entre resistencia de fatiga a torsión y resistencia a fatiga uniaxial. El efecto de la resistencia a fatiga uniaxial se estudia primero, y después se estudiará el efecto de la tasa.

Una rueda ferroviaria de 0.914 m bajo una carga uniaxial de 160 kN se usa para el cálculo. La curva S-N de fatiga toma el mismo formato que la mostrada en la figura 48. Se han explorado cinco experimentos numéricos diferentes usando diferentes límites de resistencia a fatiga. Las tasas de acumulación de daño para los diferentes límites de resistencia a fatiga se representan en la figura 54.

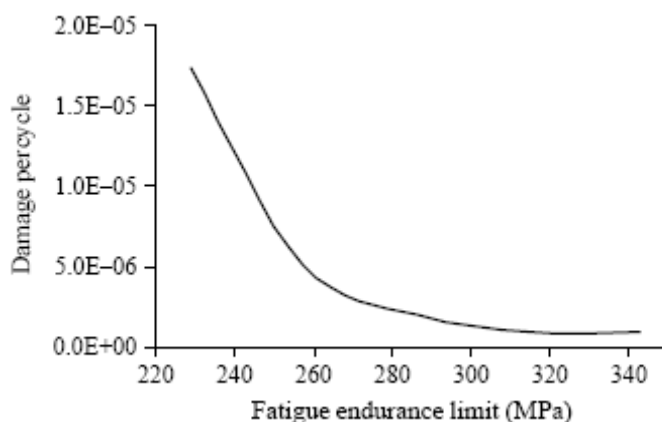


Figura 54. Relación entre tasa de acumulación de daño y el límite de resistencia a fatiga

De la figura 54, se observa que la tasa de acumulación de daño por fatiga descende según crece la resistencia a fatiga del material, como es de esperar. En este caso, las fisuras no se inician si el límite resistente a fatiga del material es mayor que 340 MPa. Los límites de fatiga en los datos de ensayo en laboratorio indican que la vida a fatiga está alrededor de los  $10^7$  ciclos (sobre 32000 kilómetros en servicio), lo cual está por debajo de la vida a fatiga observada normalmente para ruedas ferroviarias. Esto se debe principalmente a dos razones. Una es que la vida total de la rueda ferroviaria es la suma de la vida de inicio de fisura y de la vida de propagación de fisura. En el estudio actual,

solo se tiene en cuenta la vida de inicio de fisura por fatiga y no se incluye la vida de propagación de fisura. Una rueda llegando a su vida de inicio de fisuras no siempre conduce al fallo. La otra razón es que los datos de ensayo en laboratorio son obtenidos bajo condiciones de carga constante. De acuerdo a los datos de la Union Pacific, un gran número de ciclos de carga en ruedas ferroviarias someten a las ruedas a una tensión que está muy por debajo de la resistencia a fatiga, lo cual indica que esos ciclos de carga no causan daño a las ruedas.

#### 4.3.3.5. DUCTIBILIDAD DEL MATERIAL

En el modelo de fatiga multiaxial propuesto, el parámetro del material  $s = t_{Nf}/f_{Nf}$ , es importante, y es el cociente entre la resistencia a fatiga de torsión y la resistencia a fatiga multiaxial. Varios autores [38,39] relacionan este parámetro con la ductibilidad del material,  $s$  crece con la fragilidad del material. Para la mayoría de las coladas de hierro para ruedas ferroviarias, su valor está dentro del rango  $1/\sqrt{3} \leq s \leq 1$ .

Para el cálculo se usa una rueda ferroviaria de 0.914 m con una carga vertical de 160 KN. Se calculan los valores de la tensión máxima equivalente para diferentes valores de  $s$  y se representan en la figura 55. Destacar que no solo cambia el valor de la tensión equivalente máxima según aumenta  $s$ , si no también, dependiendo de la localización en la rueda. Los valores de la tensión equivalente para dos localizaciones distintas se reflejan en la figura. Una localización está 5 mm por debajo de la superficie de rodadura y la otra están en la misma banda de rodadura.

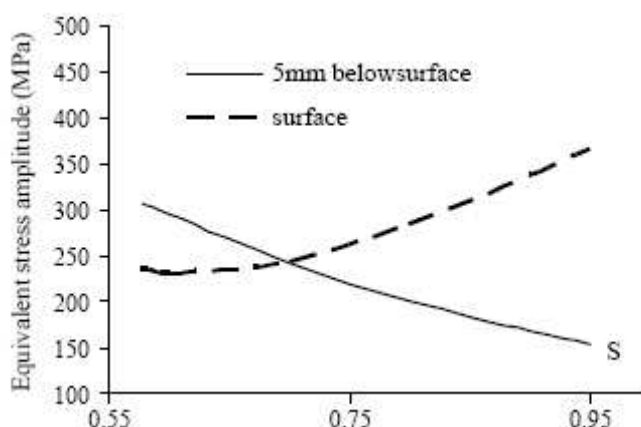


Figura 55. Valores máximos de la tensión equivalente para materiales vs. a  $s$ .

De la figura 55, se observa la diferente tendencia para los valores de la tensión equivalente máxima correspondientes a  $s$ . Para valores bajos de  $s$ , la fisura es más

probable que se inicie bajo la superficie. Para valores de  $s$  mayores (materiales más frágiles), la fisura probablemente se iniciará en la superficie. La tensión máxima de cortadura (tensión de Tresca) y la distribución de tensiones normales se representan en la figura 56. La figura 56 muestra que la tensión máxima normal y la tensión más pequeña de cortadura se encuentran en la banda de rodadura, en la superficie, y la tensión máxima de Tresca y una tensión normal menor se encuentra a cierta profundidad, bajo la banda de rodadura. Acorde al modelo de fatiga multiaxial propuesto, el daño a fatiga final es la suma de las contribuciones tanto de la tensión normal como de la de cortadura. Para un material dúctil, el plano crítico está cercano al plano de tensión máxima a cortadura y es más probable iniciarse para una localización con tensión de cortadura elevada (bajo cierta profundidad de la banda de superficie). Para un material frágil, el plano crítico está cercano al plano de tensión principal máxima y es más probable iniciarse para una localización con mayor tensión normal (en la superficie de la banda de rodadura).

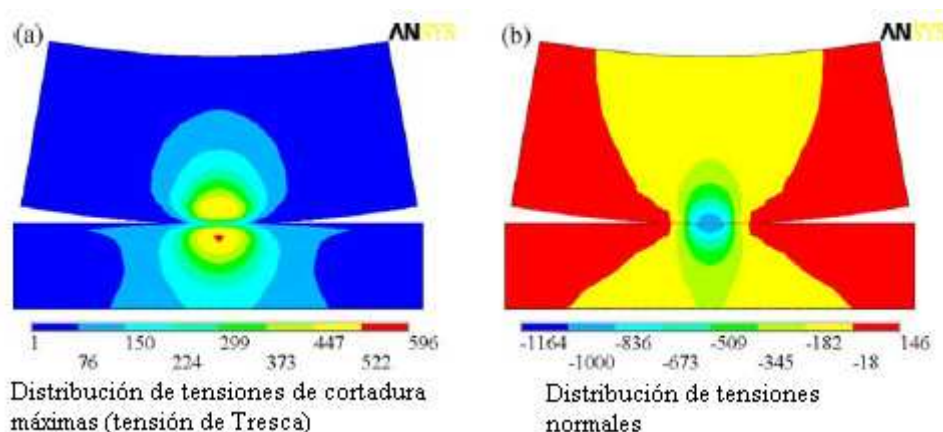


Figura 56. Distribución de la tensión de Tresca y normal para el contacto rueda-carril.



#### **4.4. CONCLUSIÓN**

En este artículo se desarrolla un modelo de predicción de vida a fatiga multiaxial, el cual está basado en la propuesta del plano crítico. A diferencia de la mayoría de los modelos previos basados en el plano crítico, el plano crítico de este estudio no solo depende del estado de tensión si no también depende de las propiedades del material.

El nuevo modelo de fatiga multiaxial está aplicado para la predicción de vida con fatiga multiaxial del problema de contacto rueda-carril. Se ha usado un análisis por elementos finitos no lineales para calcular las tensiones y también una técnica de submodelado para mejorar la eficacia y exactitud en los resultados. La historia tensional se usa entonces para calcular la vida a fatiga. Un ejemplo numérico se ha implementado y comparado con las observaciones de campo de modelos de fallo. El efecto de distintos parámetros, como diámetro de la rueda, cargas verticales, dureza del material, resistencia a fatiga y ductibilidad del material, en el daño por fatiga para ruedas ferroviarias se ha estudiado usando el modelo propuesto.

En el estudio presente, se estudian los efectos de los diferentes parámetros de manera independiente. Futuras investigaciones deben considerar los efectos de la interacción de varios parámetros ya que el problema del contacto rueda-carril es no lineal. Por ejemplo, ¿cuál sería la variación en el daño si cambian tanto dureza como carga vertical al mismo tiempo? Se necesitan datos experimentales muy extensos para validar tal interacción entre modelos. También, otros efectos, tales como tensiones residuales durante la fabricación, cargas de frenados, cargas térmicas, cargas de impacto y dinámicas, defectos de material, etc, necesitan ser incluidas en la metodología propuesta.



## **CAPÍTULO 4**

### **MANTENIMIENTO DE RUEDAS**





## **CAPÍTULO 5.**

# **MECÁNICA DE FRACTURA** **APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS**

### **5.1. INTRODUCCIÓN**

La fractura es el mayor problema que puede ocurrir en una rueda en servicio, causando generalmente un descarrilamiento. Las condiciones extremas que soportan las ruedas, principalmente después de pasajes con grandes inclinaciones junto con frenadas de larga duración, causan elevadas tensiones residuales.

En ruedas con planos de frenado, la mayoría de las fracturas se inician por fisuras a fatiga en la banda de rodadura. Las fisuras que llevan a fallo se asocian a menudo con algún tipo de inclusiones, dentro del campo metalúrgico, o cortes dentro del campo mecánico. Los recalentamientos de las ruedas generan unas tensiones circunferenciales muy elevadas, que conllevan el crecimiento de las fisuras y por tanto la destrucción de la rueda.



El comportamiento de fisuras en componentes puede ser evaluado por métodos de mecánica de fractura, siendo necesario por tanto conocer el valor de la tenacidad de fractura  $K_{IC}$ . La fractura ocurre si bajo tensiones mecánicas o residuales el valor del factor intensidad de tensiones supera al crítico, tenacidad de fractura

## **5.2. MEDIDA DE LA TENACIDAD DE FRACTURA**

En 1985 los ferrocarriles europeos y ERRI (European Rail Research Institute) comienzan numerosas investigaciones relativas a problemas en servicio debido a fallos en ruedas. Los primeros estudios en tenacidad de fractura se dan en 1989 por el Comité de Especialistas B 169 de la ERRI [40]. En este grupo, productores trabajan junto con los técnicos en ferrocarriles y miembros de distintas universidades. La tarea del grupo B 169/4 es definir un procedimiento de ensayo de tenacidad de fractura en ruedas ferroviarias con acero calidad R7, que posteriormente pueda ser reproducido y repetido.

En el año 1991 los ferrocarriles suizos se ven afectados por un duro descarrilamiento y desde entonces el Instituto de Metalurgia de este país se compromete él mismo con la cuestión de cómo mejor definir los materiales de las ruedas y como usar los parámetros de la mecánica de fractura en este contexto. Los resultados obtenidos tras el estudio del descarrilamiento en Stein-Säckingen [41] muestran claramente que la tenacidad de fractura de la rueda es insuficiente. La figura 1 muestra la rueda dañada y la trayectoria de la fisura, la cual crece de forma radial hacia el eje de la rueda. La fisura se origina en la superficie exterior de la llanta y el tamaño de fisura crítico, que lleva a la fractura, es de 25 mm de longitud. Con este trabajo se consigue la motivación y el compromiso para la introducción de la mecánica de fractura en la industria del ferrocarril.

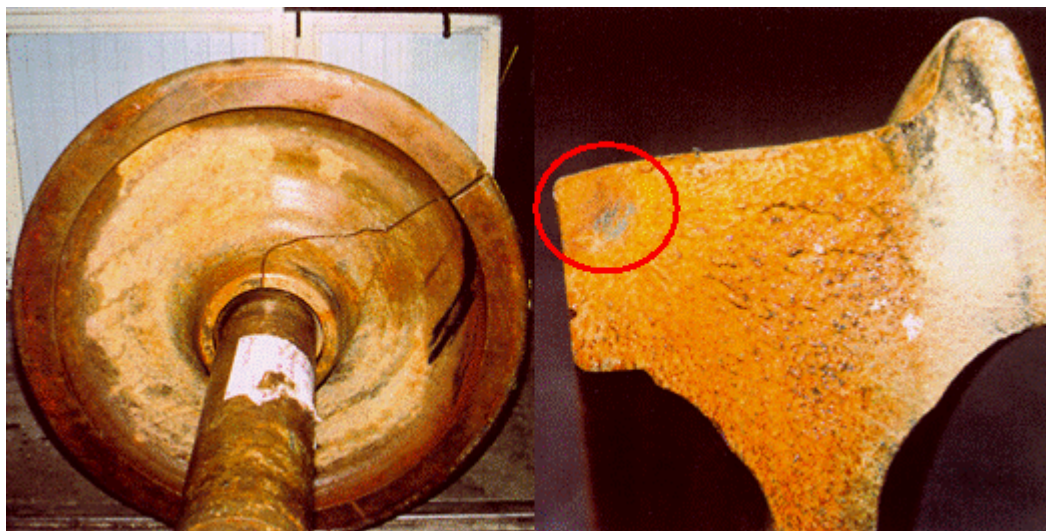


Figura 1: Rueda fracturada por el descarrilamiento de Stein-Säckingen (izquierda). Superficie final de fractura (derecha) con el inicio de la fisura crítica (círculo).

El trabajo de investigación del comité B 169 [42,43] muestra con claridad, que la tenacidad de fractura puede ser una norma de calidad del acero R7. Este valor se conoce en muchas áreas técnicas y en muchas ocasiones es requerido como una condición de suministro. La mecánica de fractura responde a las siguientes cuestiones:

- ¿Qué cargas no se pueden aplicar para que una fisura crezca desde su tamaño inicial hasta el tamaño de fisura crítico?
- ¿Qué tamaño de fisura puede ser tolerado conociendo la carga a la que está sometido? Por ejemplo, ¿cuál es el tamaño crítico de fisura?

Si bajo tensiones mecánicas o residuales una fisura alcanza su valor crítico, la fractura se produce. Esto también se puede explicar como que la fractura ocurre, cuando el factor intensidad de tensión  $K_I$  alcanza un valor crítico  $K_{IC}$ .  $K_{IC}$  es la llamada tenacidad de fractura y es la medida de la resistencia de un material a rotura.

Ruedas acorde a la norma UIC pueden romper en servicio como resultado de tensiones residuales debido a frenadas continuas. La tenacidad de fractura de estas ruedas generalmente se encuentra entre  $40 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . La investigación llevada a cabo por este grupo en un banco de frenado muestra que ruedas con  $K_I > 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  no rompen en zonas donde ruedas con  $K_I \sim 65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  pueden romper. Este resultado se confirma por medidas en ruedas que han roto en servicio. Por tanto es necesario modificar las condiciones de los suministros de manera que se garantice un valor mínimo de tenacidad de fractura en torno a  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

El factor intensidad de tensiones  $K_I$  para una fisura en el borde semi-elíptica puede ser calculado usando la ecuación (1):

$$K_I = 1.32 \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{a}$$

$\sigma_n$ : tensión aplicada en servicio

$a$ : longitud de fisura

Con las medidas de longitud de fisura de una rueda fracturada y la tenacidad de fractura  $K_{IC}$  es posible obtener una estimación de las tensiones residuales en el borde de la rueda. Para un valor de  $K_I$  de  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y una longitud de fisura crítica de  $20 \text{ mm}$  se obtiene una tensión residual de  $\sigma_n = 375 \text{ MPa}$  (figura 2).

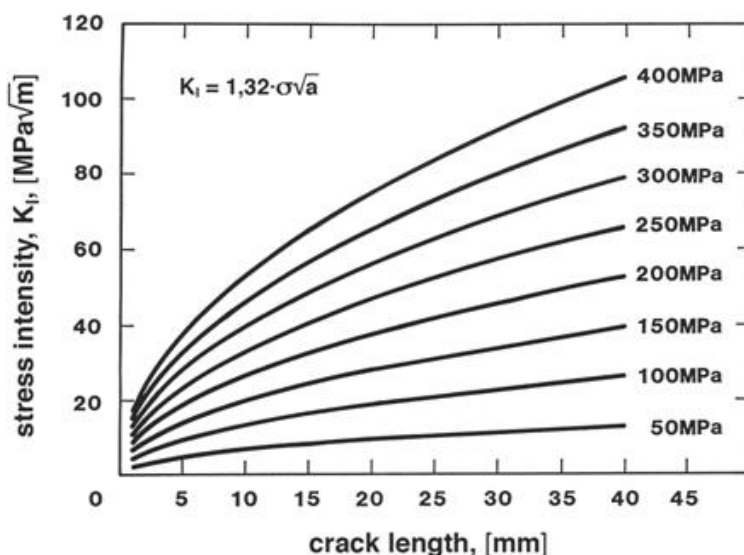


Figura 2: Intensidad de tensión en función de la longitud de fisura para diferentes tensiones usando la ecuación indicada.

Las condiciones de las ruedas suministradas están reflejadas en la UIC folleto 812-3. Acero R7 generalmente se usa para ruedas sólidas de vehículos de carga, por estar menos expuestas a fractura. Sin embargo las investigaciones han probado que materiales R7, acorde a las especificaciones de la UIC (análisis químico, resistencia, propiedades frente impacto, etc), en la práctica tienen valores de tenacidad de fractura completamente diferentes de unas ruedas a otras .

Este hecho sin embargo no sorprende, ya que la tenacidad de fractura no se exigía hasta el momento que comenzaron las investigaciones, en las especificaciones de los materiales suministrados.

La determinación de la tenacidad de fractura de un material puede hacerse de una manera sencilla. Una muestra de tamaño conocido con una fisura realizada por fatiga se somete a una máquina de tensión hasta fractura. La tensión de fallo  $\sigma_c$  puede ser calculada por la carga y la función  $f(a/W)$  dependiendo esta última de la geometría de la probeta. El valor crítico de la intensidad de tensión en el momento del fallo se obtiene por (2):

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

donde  $W$  es el ancho de la probeta de ensayo. Por otro lado si conocemos  $K_{Ic}$  y  $\sigma_c$ , entonces se puede determinar el tamaño de fisura crítico.

### 5.2.1. MEDIDA DE $K_{Ic}$ CON EL MÉTODO ESTÁNDAR

El procedimiento principal para llevar a cabo ensayos de mecánica de fractura está publicado en las normas ASTM E 399. Muestras CT (tensión compacta) se utilizan a menudo para realizar el ensayo (figura 3). Para el ensayo de  $K_{Ic}$  acorde a ASTM E 399 la carga  $P$  y el desplazamiento de apertura de la fisura  $v$  son medidos en la línea de carga. El gráfico está representado con el método de la secante.

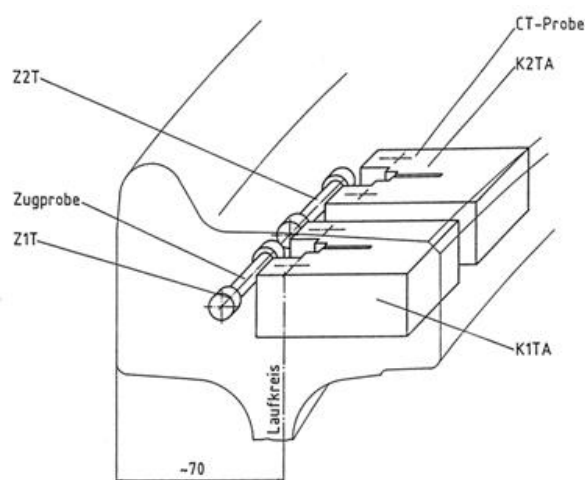


Figura 3: Probeta CT y orientación dentro de la llanta de la rueda

Los requerimientos de la norma ASTM aplicada para determinar la tenacidad de fractura de materiales de ruedas a menudo no se cumplen, especialmente cuando los valores de tenacidad son muy elevados. Se deben cumplir las dos condiciones siguientes



## MECÁNICA DE FRACTURA APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS

### CAPÍTULO 5

para que el valor calculado de  $K_Q$  coincida con el valor de la tenacidad de fractura  $K_{IC}$ , parámetro característico de cada material.

- espesor probeta (3)

$$B, a \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_y} \right)$$

B: espesor, a: longitud fisura;

$\sigma_y$  : límite elástico

-el cociente (4)

$$\left( \frac{P_{MAX}}{P_Q} \right) \leq 1.1$$

$P_{MAX}$ ,  $P_Q$ : ver figura 4-6.

El factor intensidad de tensiones  $K_Q$  se determina como sigue (5):

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

W: ancho de la probeta CT

$f(a/W)$ : función de la geometría

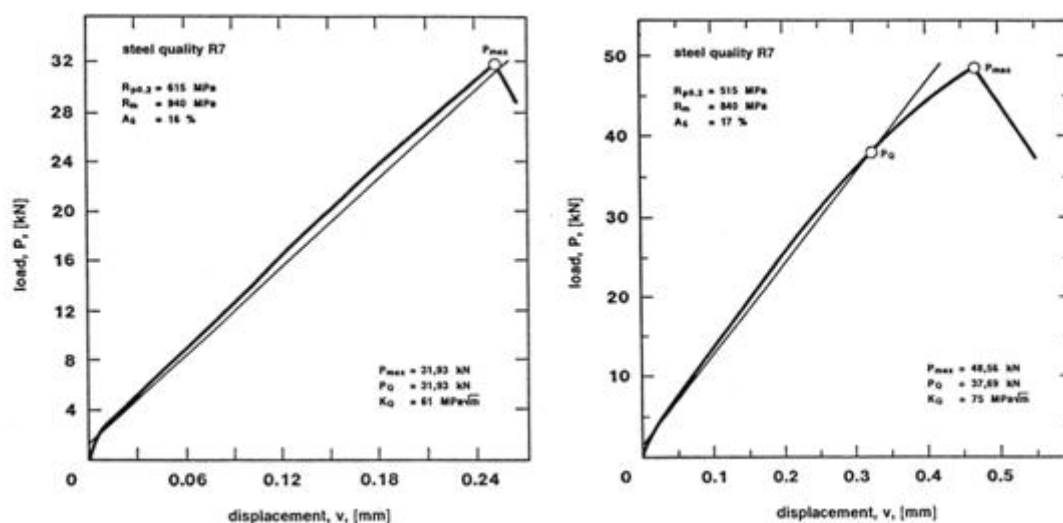


Figura 4 (izquierda): Curva de carga frente a desplazamiento para un ensayo válido de  $K_{IC}$  acorde con la norma.

Figura 5 (derecha): Curva de carga frente a desplazamiento con un incremento adicional en el desplazamiento y con deformación plástica. Después de pasar  $P_{max}$  ocurre la fractura frágil. La tenacidad de fractura  $K_Q$  es calculada usando  $P_Q$ .

Algunos resultados de ensayos de tenacidad de fractura en acero R7 se muestran en tres ejemplos para curvas de carga-desplazamiento. La figura 4 muestra un ensayo válido que cumple las condiciones (3) y (4). En este caso el valor de  $K_Q$  puede ser considerado como el de tenacidad de fractura  $K_{IC}$ . La superficie de fractura es plana y no muestra ninguna deformación en las caras de los lados (ver figura 7). La curva carga-desplazamiento de la figura 5 muestra un incremento adicional en el desplazamiento después de la parte lineal de la curva. En estas condiciones no se cumplen (3) ni (4).



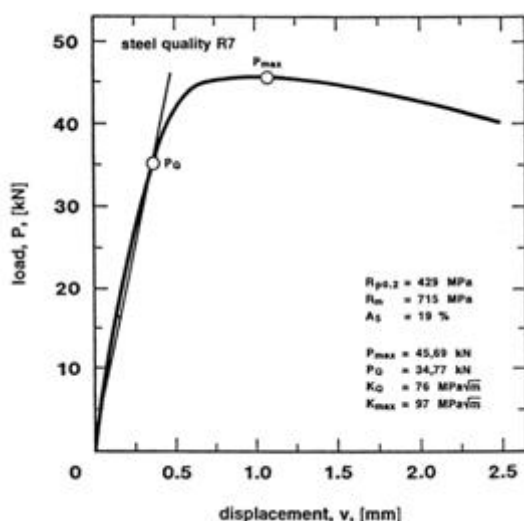


Figura 6 (izquierda): Curva carga-desplazamiento para una muestra que no rompió durante el ensayo. La tenacidad de fractura  $K_{max}$  en este caso es calculada con  $P_{max}$ .  
Figura 7 (derecha): Probeta CT fracturada al ser sometida a los ensayos descritos en las figuras 4-6.

Otra categoría es el comportamiento mostrado en la figura 6. Se puede observar que no existe un crecimiento de la fisura inestable, que conduzca a la fractura frágil de la probeta. La norma ASTM E 399 no puede ser aplicada. A veces puede ser útil reemplazar  $K_Q$  por  $K_{max}$ , lo cual representa un mejor comportamiento del material.

Según la norma EN 13262 respecto a las características de tenacidad de la llanta, el valor medio a obtener para un acero de calidad R7 en seis probetas debe ser mayor o igual a  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , y ningún valor individual debe ser menor que  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

Respecto a las investigaciones del grupo de trabajo B 169/4 del ERRI, la norma ASTM E 399 fue elegida como método de ensayo para la medida de la tenacidad de fractura. El resultado más importante de esta investigación es que tras realizar las medidas de tenacidad de fractura de varios conjuntos de ruedas los valores de  $K_Q$  obtenidos están entre  $78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y  $85 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , demostrando que la tenacidad de fractura deseada pueda ser alcanzada por la producción industrial. Métodos apropiados de seguridad y calidad deben garantizar el nivel requerido de este valor.



### 5.2.2. MEDIDA DE $K_{IC}$ CON OTROS PARÁMETROS

A la vez que el grupo B169/4 del ERRI lleva a cabo su trabajo, Lucchini Sidermeccanica mayor fabricante de ruedas ferroviarias para los ferrocarriles italianos Trenitalia, procede a caracterizar el acero R7T no solo en términos de mecánica de fractura elástico lineal LEFM (figura 8), si no también en términos de mecánica de fractura en régimen plástico PYFM (figura 9).

El principal problema que resulta de la mecánica de fractura lineal elástica es que los procesos de liberación y absorción de energía correlacionados con el inicio del crecimiento inestable de fisura, están gobernados por un solo parámetro de intensidad de tensión  $K_Q$ , medida de la resistencia de rotura de un material. La tenacidad de fractura  $K_{IC}$  es el factor intensidad de tensiones crítico en condiciones elástico lineales. La estabilidad de una fisura en ciertas condiciones de carga se conoce por la comparación entre un valor de  $K_Q$  calculado y el valor crítico  $K_{IC}$ .  $K_Q$  describe el campo de tensión elástico de la punta de la fisura. Cuando  $K_Q$  alcanza el valor crítico  $K_{IC}$  comienza la fisura. Si la zona plástica  $r_p$  de la punta de la fisura es pequeña, el campo elástico gobernado por  $K_Q$  controla el proceso en esta área.

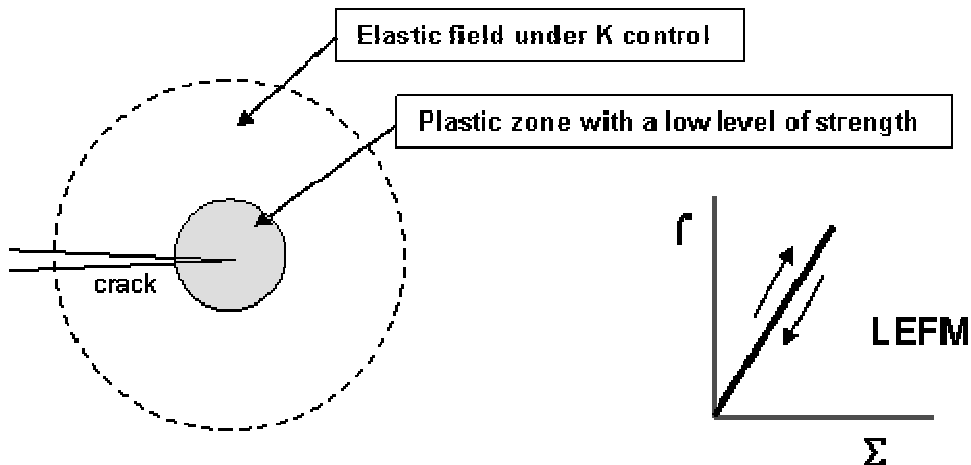


Figura 8: Criterio LEFM, aplicado en casos de pequeñas zonas plásticas en extremo de fisura.

Cuando  $r_p$  aumenta, no es posible encontrar un campo elástico en el extremo de la fisura que sea independiente de la geometría. Así, hay una fuerte interacción entre la influencia de la zona plástica y elástica. La dependencia del campo plástico del espesor de la muestra plantea una dificultad, una fractura producida en laboratorio en pequeñas muestras no representa la estructura original en servicio de la rueda. El parámetro de tenacidad de fractura  $K_Q$  puede proporcionar una evaluación parcial de la tenacidad de

fractura de ruedas enterizas que no tienen suficiente espesor para obtener condiciones de deformación plana en la punta de la fisura.

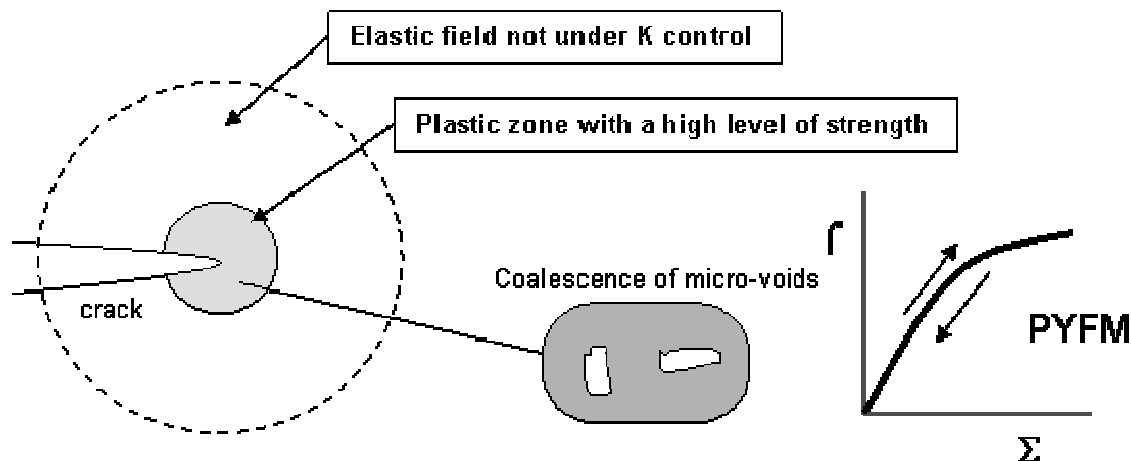


Figura 9: Criterio PYFM, aplicado en casos de una gran zona plástica en el extremo de la fisura.

Para determinar la tenacidad de fractura para una rueda en condiciones de régimen plástico, son necesarios otros parámetros mecánicos.

#### 5.2.2.1. INTEGRAL-J

Cuando el campo plástico es dominante, se utiliza un parámetro particular llamado Integral-J para representar las características del extremo de la fisura.

J describe las condiciones del extremo de la fisura cuando la fractura no es frágil si no dúctil, y puede ser usado como un criterio de fractura, ya que cuando J alcanza el valor de  $J_{IC}$  se inicia la propagación estable de la fisura. Los valores de  $J_{IC}$  pueden ser convertidos a valores de  $K_{IC}$ . Un ejemplo del procedimiento en el campo del ferrocarril se encuentra en el Documento Técnico DT 251 (B169).

Este método de ensayo se considera muy caro y de mucho consumo de tiempo, aunque si muy significativo. Por lo tanto se propone usar otro ensayo con parámetros similares.



#### **5.2.2.2. $K_{EE}$ , METODOLOGÍA DE ENERGÍA EQUIVALENTE**

La integral  $J$  es uno de los parámetros más representativos de la mecánica de fractura, pero como se ha mencionado antes, su determinación es demasiado cara y de consumo de tiempo elevado. Hay otro parámetro, correlacionado a la energía, llamado  $K_{EE}$ , que muestra muchas similitudes con  $J_{IC}$  y  $K_{IC}$  respectivamente, pero es más fácil de obtener.

Para seleccionar este parámetro innovador, se pone especial atención al diagrama carga-desplazamiento. En efecto hay una variación en la linealidad como se ha visto en las figuras 4-6. No hay una propagación de fisura inestable pero si un incremento progresivo del área plástica del fondo de la entalla y alrededor del extremo de la fisura, donde está la máxima tensión. Si se analiza la forma de la curva carga-desplazamiento está claro que el área representa la energía absorbida antes de un fallo inesperado de la muestra en condiciones de régimen plástico locales.

Por estas razones Lucchini Sidermeccanica selecciona el parámetro de energía equivalente  $K_{EE}$  de acuerdo a la norma ASTM E992-84, un procedimiento de ensayo que ya ha sido usado para caracterizar los nuevos materiales forjados.

La medida de  $K_{EE}$  muestra un método simple y económico para determinar la tenacidad de fractura de muestras que son relativamente pequeñas, casos que no son de deformación plana. Si comparamos las metodologías para evaluar  $K_Q$  y  $K_{EE}$ , podemos encontrar algunas similitudes pero también algunas diferencias. El parámetro de tenacidad aparente  $K_Q$  no es un parámetro de los materiales ( $K_{IC}$ ), como depende de la geometría y dimensiones de la muestra.  $K_{EE}$  combinado con  $K_Q$  puede dar información adicional de la tenacidad de fractura de ruedas enterizas. Este puede ser fácilmente usado para definir un criterio de aceptación más completo del material. En efecto, ambos parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$  pueden ser evaluados con una sola muestra CT 30 que es muy ventajoso en términos de tiempo y coste.

El parámetro  $K_{EE}$  se calcula acorde a la norma usando la curva carga-desplazamiento. Un ejemplo se muestra en la figura 10.

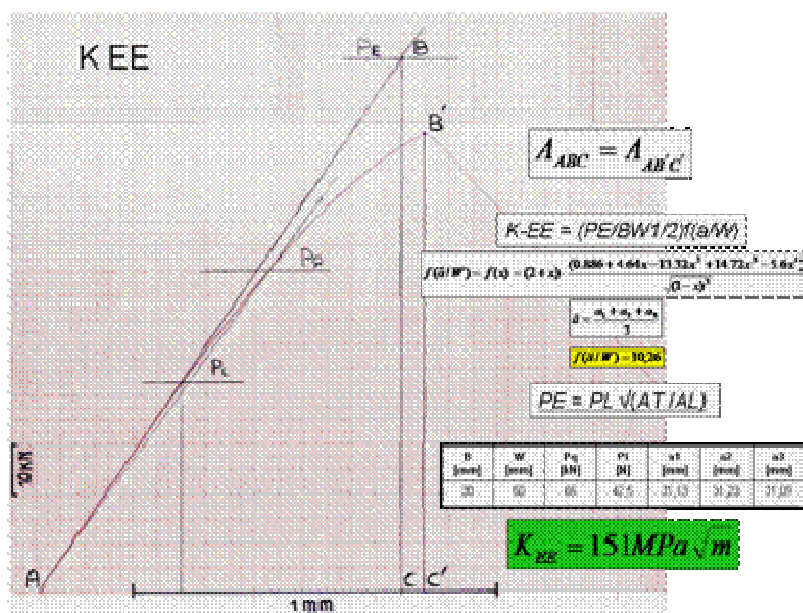


Figura 10: Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de  $K_{EE}$  acorde a ASTM E992

### 5.2.2.3. $K_0$ , TENACIDAD DE FRACTURA EN TÉRMINOS DE $K_0$

El método para la determinación del valor  $K_Q$  se describe de forma muy sencilla, en la figura 11. Se toma como valor de la carga el valor de  $P$  a partir del cual la gráfica pierde la linealidad, considerándolo como  $P_Q$ .

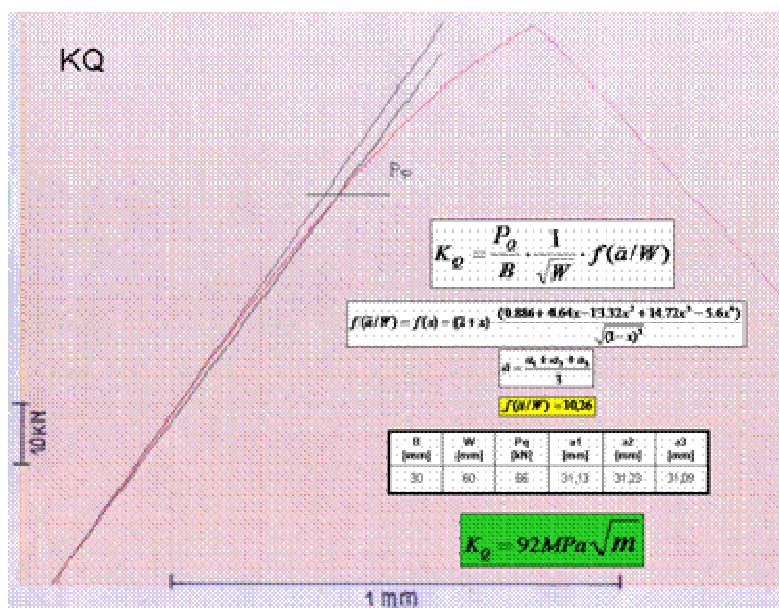


Figura 11: Curva carga-desplazamiento para un ensayo de  $K_0$  acorde a ASTM E399

### 5.2.3. VALORES OBTENIDOS DE TENACIDAD DE FRACTURA

Los ensayos llevados a cabo por Lucchini Sidermeccanica deliberan dos cosas:

- Diagramas carga-desplazamiento y valores de los dos parámetros  $K_{EE}$  y  $K_Q$  de la mecánica de fractura
- Fotografías de la superficie de fractura.

La investigación muestra tres aspectos principales diferentes:

- Ruedas enterizas con tenacidad de fractura alta, ambas en términos de  $K_{EE}$  y  $K_Q$
- Ruedas enterizas con tenacidad de fractura baja, ambas en términos de  $K_{EE}$  y  $K_Q$
- Ruedas enterizas con el mismo valor de  $K_Q$ , pero diferentes valores de  $K_{EE}$

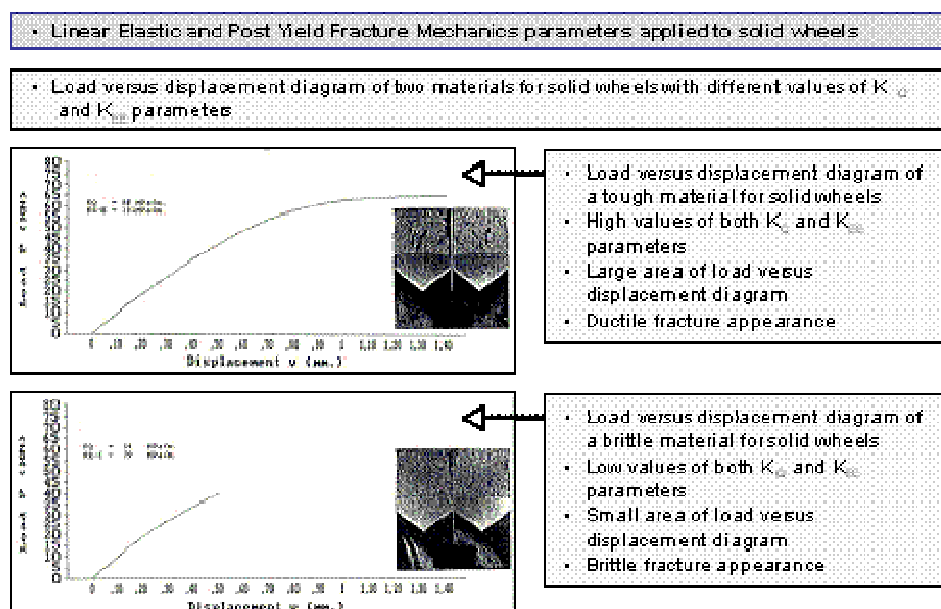


Figura 12: Diagrama de carga-desplazamiento de dos materiales para ruedas enterizas con diferentes valores de los parámetros  $K_{EE}$  y  $K_Q$ .

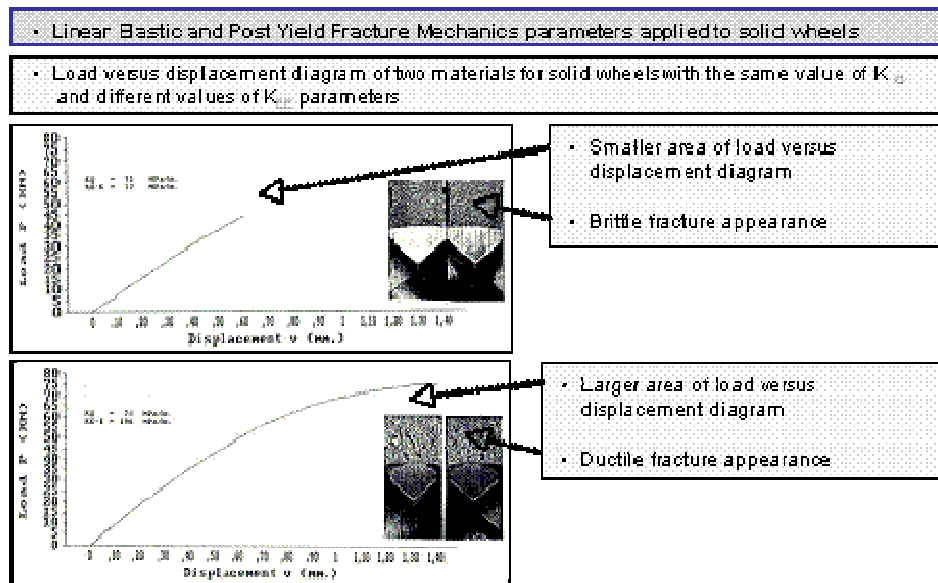


Figura 13: Diagrama de carga-desplazamiento de dos materiales de ruedas enterizas con el mismo valor de  $K_Q$  y diferentes valores de  $K_{EE}$ .

Si  $K_Q$  es mayor que un cierto valor umbral (asumido por  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) el conocimiento de  $K_{EE}$  da información adicional en el comportamiento en el campo elasto-plástico, pero no es necesario. Por otra parte si  $K_Q$  es menor que este valor umbral, la evaluación de  $K_{EE}$  es esencial.

-Si  $K_{EE}$  es menor que un umbral adoptado, se confirma la baja tenacidad de fractura del material

-Si  $K_{EE}$  es mayor, el material puede ser considerado como válido, a pesar del bajo valor de  $K_Q$ .

El Instituto de Metalurgia generó más de 300 valores de tenacidad de fractura desde ruedas fracturadas y sin fracturar fuera de servicio y desde pruebas de carretera, de distintos fabricantes. Todos los datos son del acero calidad R7 y están recogidos en la figura 14.

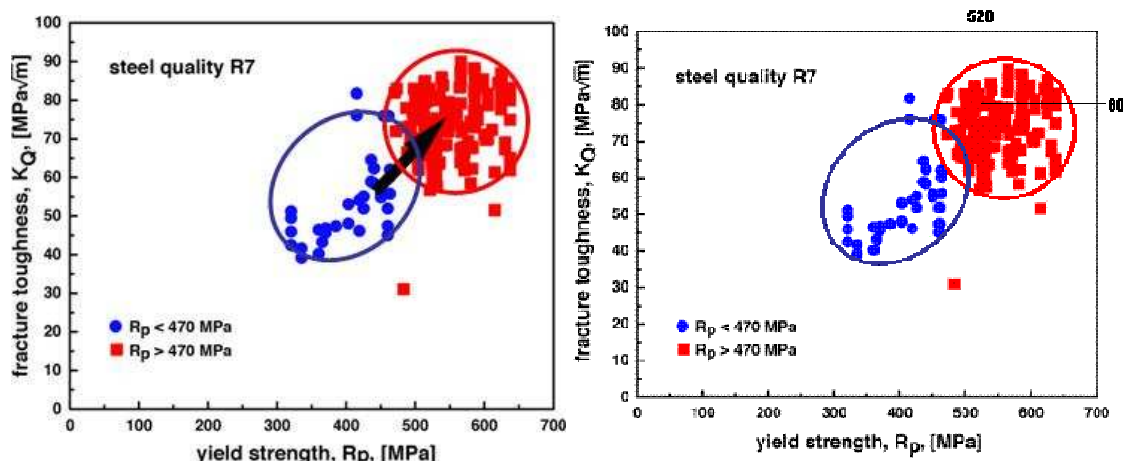


Figura 14: Tenacidad fractura  $K_Q$  representada frente al límite elástico  $R_p$  de todos los ensayos llevados a cabo por el Instituto de Metalurgia, ETH de Zurich

Figura 15: Tenacidad de fractura  $K_Q$  representado frente al límite elástico  $R_p$  de aceros R7. En la esquina superior derecha algunos límites del límite elástico y de tenacidad son indicados.

Una buena forma para mostrar la calidad de un material es la tenacidad de fractura junto con su límite elástico. En la figura 15 los valores de tenacidad están divididos en dos secciones: aquellas con límite elástico menor de 470 MPa y aquellas con límite elástico mayor de 470 MPa. Casi todos los valores de  $K_Q$  del primer grupo están por debajo de 70 MPa√m. También se observa que los valores del segundo grupo tanto de tenacidad como de límite elástico son mucho mayores que los del primero. Se puede afirmar ahora que este cambio de los valores está en la dirección correcta, resistencia mayor y mejor tenacidad.

En la figura 15 están marcados los valores umbral para aceros de calidad R7 relativos a tenacidad y resistencia. Solo unas pocas de las ruedas ensayadas alcanzan las condiciones de 80 MPa√m con una resistencia suficiente de 520 MPa, siendo muy importante destacar que los fabricantes pueden llegar a conseguir esos valores.

Los ensayos dentro del grupo B 169/4 muestran que el valor de  $K_Q$  puede estar entre 78 MPa√m y 85 MPa√m. Es necesario tener un valor de tenacidad suficientemente elevado junto con una resistencia suficiente. Un buen índice de calidad para las propiedades mecánicas de aceros es el resultado del producto de límite elástico y tenacidad de fractura. Esta relación está indicada en la figura 16. Modernos desarrollos en acero han doblado este índice de calidad cada década desde 1960. El área sombreada en la figura 16 muestra la dispersión de calidades de acero R7.



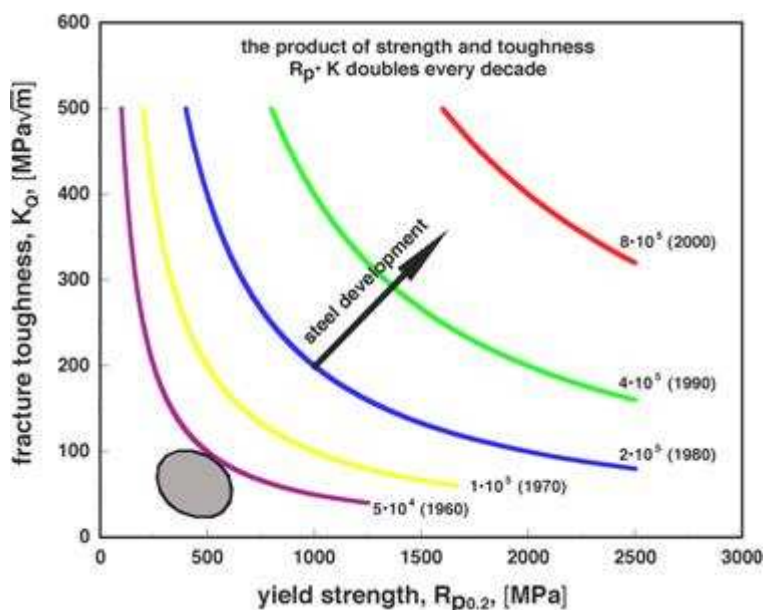


Figura 16: Combinación de resistencia y tenacidad de varios aceros. El área sombreada indica acero R7.

Esta área se presenta otra vez en la figura 17 y muestra que el índice de calidad de los años 60 se asemeja hoy en día con la calidad de acero R7T. Se observa que hay gran cantidad de acero excediendo este valor pero no están siendo aplicados a material ferroviario. Esta estructura debe ser mantenida por razones de resistencia al desgaste. Pero hay todavía algunas posibilidades de mejorar la tenacidad y en paralelo el límite elástico:

- Uso de aceros limpios (bajos contenidos de sulfuros y fosfuros y otros residuos).
- La reducción de inclusiones muestra un incremento favorable en tenacidad de fractura.
- Un buen análisis químico equilibrado. Algunos elementos causan una disminución en la tenacidad (Ti), otros un incremento en la tenacidad (Ni).
- Estructura perlítica homogénea con una cantidad de ferrita en torno al 10%-15%, preferentemente en el límite de grano, y un tamaño de grano fino.
- Un tratamiento térmico equilibrado.

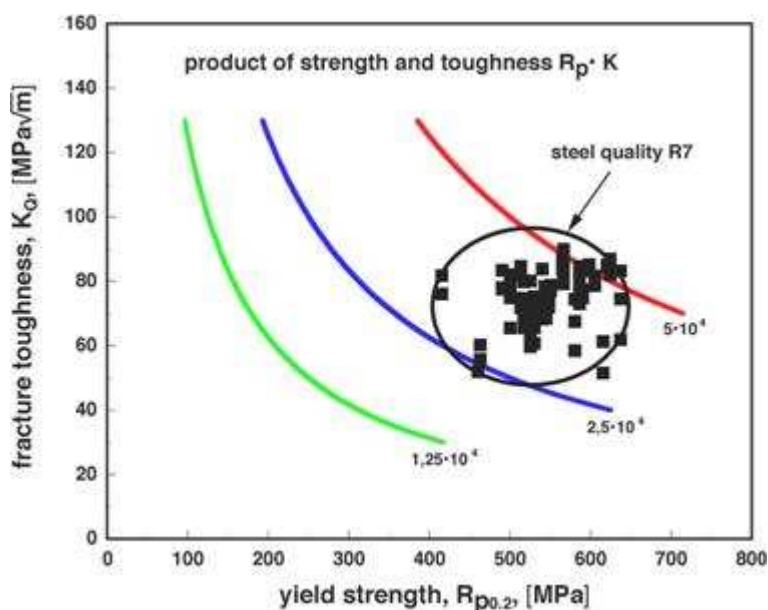


Figura 17: Vista cerrada en el área de aceros R7

Como consecuencia de este trabajo por los especialistas del ERRI comité B 169 se desarrolló otra norma EN 13262:2004. Junto con esta norma entre otros, están definidos la tenacidad de fractura  $K_Q$  y el límite elástico  $R_p$ . Además  $K_{EE}$  puede ser considerado un parámetro útil, alternativo a la integral  $J$  ( $J_{IC}$ ) que proporciona información en términos de mecánica de fractura en régimen plástico. Hasta el momento,  $K_{EE}$  es usado como un índice de calidad y sólo para información.  $K_{EE}$  combinado con  $K_Q$ , proporciona información adicional de tenacidad de fractura de ruedas enterizas y se usa fácilmente para definir un criterio de aceptación más completo del material durante la inspección.

En la base de las experiencias conseguidas y los resultados obtenidos, se ve que ruedas enterizas calidad R7 con bloques de frenado que no daban lugar a fracturas frágiles, cumplen la condición obligatoria de  $K_Q \geq 80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  como se describe en la nueva norma EN 13262. Medidas tomadas en ruedas fuera de la producción actual de diferentes productores en calidad R7 muestran que el valor de tenacidad de fractura recomendado  $K_Q$  puede ser obtenido.  $K_{EE}$  es un parámetro útil y puede proporcionar información más precisa sobre el comportamiento de materiales en condiciones de régimen plástico. Gran número de ensayos validan esta declaración.

En paralelo con las experiencias del grupo del ERRI, el Instituto Federal Suizo de Tecnología ETH de Zurich y Lucchini Sidermeccanica describen su experiencia para validar el criterio de la investigación para ruedas enterizas y definir un índice de calidad



indicativo de una buena producción. En efecto, un buen camino para definir la calidad de un material en producción es la introducción de un índice de calidad,  $R_p$  con  $K_Q$  que pone la tenacidad junto con el límite elástico.

Aunque el valor de  $K_Q$  normalmente necesita ser verificado en las ruedas utilizadas para frenado, Lucchini Sidermeccanica está haciendo los ensayos descritos de mecánica de fractura en toda la producción de ruedas enterizas desde hace 15 años, no solo en las ruedas de frenado. Hasta el momento Lucchini Sidermeccanica ha coleccionado alrededor de 90000 medidas, que se encuentran en su base de datos.

### **5.3. APLICACIÓN DE LA MECÁNICA DE FRACTURA EN LA PRODUCCIÓN DE RUEDAS**

Los criterios de la mecánica de fractura no se toman en cuenta en las especificaciones de ferrocarriles europeos, hasta pasados los años 80. La mayor parte de las especificaciones europeas usadas, no requerían parámetros de ensayo directos que pudieran evitar la fractura frágil de ruedas enterizas, no solo en términos de criterios de diseño, que no permitían optimizar la configuración de la rueda con análisis con elementos finitos, si no también en términos de criterios de ensayo de los suministros.

De hecho, un punto de referencia para evaluar el nivel de calidad de ruedas enterizas en Europa fue la especificación 812.3 de la UIC, en la cual los límites de tenacidad de fractura aceptables no eran mencionados, hasta la introducción del criterio del ERRI. La clase de acero R7T fue generalmente usada por las ruedas de tren frenadas por zapatas, porque esta clase fue considerada en Europa como la menos expuesta a fracturas. En este periodo, la velocidad en el ferrocarril se incrementó y se recogieron algunos casos de fractura frágil en ruedas enterizas de R7T. Las primeras aplicaciones de los criterios de la mecánica de fractura son visibles en informes de análisis de fallo, encargados a universidades especializadas o institutos de investigación, para clarificar que ruedas acordes a la especificación de la UIC podían romper. Hoy, esta situación no sorprende, porque conocemos que los requerimientos de tenacidad de fractura no fueron mencionados en la especificación de los suministros, y materiales R7T que cumplen la especificación CEN UIC podían tener, en la práctica, valores de tenacidad de fractura completamente diferentes de unas ruedas a otras, siendo todas ellas válidas por la UIC.

La estadística en ruedas enterizas frenadas por zapatas que rompieron mientras prestaban servicio para diferentes ferrocarriles representó el único indicador de calidad



## **MECÁNICA DE FRACTURA APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS**

### **CAPÍTULO 5**

del producto. En 1975 algunos casos de fallos en locomotoras neumáticas pusieron en contacto a Ferrocarriles Suizos SBB con las primeras aplicaciones de los criterios de la mecánica de fractura elástico lineal LEFM, gracias al informe de análisis de fallo que escribió un cliente [44]. De todos modos, los ferrocarriles Suizos SBB recogieron fallos significantes en ruedas enterizas desde 1980 (que se doblaron desde 1985) principalmente recogidos después del recorrido por los dos pasos de los Alpes Gotthard y Lötschberg-Simplon, que tienen largas inclinaciones.

Para aclarar esta situación, los Ferrocarriles Suizos SBB empezaron un profundo programa de investigación en los casos de fallos inesperados en ruedas enterizas de material R7T durante frenado. El trabajo en cooperación con el ETH de Zurich fue determinar la tenacidad de fractura de esas ruedas que rompieron en servicio y evaluar el nivel de tensión interna que ocurrió dentro de la llanta durante y después de la frenada. Todas las actividades fueron preliminares a los grupos ORE y al comité ERRI B169, los cuales han tenido el mérito de examinar y resolver fundamentalmente el problema.

En el mismo periodo, Ferrocarriles Italianos Trenitalia no recogieron casos de fallos inesperados en bloques de frenado de ruedas sólidas. Este hecho se ha relacionado con el elevado nivel de calidad requerido por el suministrador de ferrocarriles italiano Trenitalia comparado con los requerimientos de la UIC y las especificaciones Europeas en este periodo.

Datos estadísticos recogidos en los años 80 demostraron que Lucchini Sidermeccanica fabricó toda la producción de ruedas enterizas para los ferrocarriles Italianos Trenitalia en la factoría de Lovere. Un tercio de estas ruedas usadas por SBB vienen también desde Lovere. En ambas poblaciones de ruedas mencionadas, nunca se han registrado fracturas frágiles en ruedas sólidas R7T por SBB y los ferrocarriles Trenitalia. La relación entre seguridad en servicio y el nivel de requerimientos de calidad en las especificaciones de los suministradores han sido puestos en evidencia por muchos tribunales de mercado llevados entre diferentes ferrocarriles. En efecto, si estudiamos los documentos de este periodo, se demuestra que los requerimientos de las especificaciones de los ferrocarriles Italianos Trenitalia fueron más selectivos que los otros, con respecto a las especificaciones de la norma UIC.

Restricciones en el rango de análisis químico, propiedades mecánicas y la introducción de parámetros adicionales e indirectos son visibles en las especificaciones del suministrador en Trenitalia empezando desde los años 80. El parámetro diferenciador principal es la introducción del requerimiento de acero desgasificado al vacío hasta 1983 para mejorar el nivel de micro-limpieza y obtener una reducción en los

defectos internos, detectables por ensayos por ultrasonidos. Como consecuencia, valores como resistencia a fatiga y tenacidad de fractura fueros cubiertos implícitamente.

### **5.3.1. DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA APLICAR LOS NUEVOS CRITERIOS DE LA MECÁNICA DE FRACTURA Y MEJORAR LAS NORMAS DE CALIDAD DEL ACERO**

La propuesta de Lucchini Sidermeccanica está influenciada por la mecánica de fractura, instalada para soportar y mejorar el proceso de fabricación. En 1991, para aplicar las metodologías del ensayo acorde a los criterios de mecánica de fractura para ruedas ferroviarias definidas por la European ERRI Group ORE B 169/4, Lucchini Sidermeccanica empieza a investigar, por dos direcciones diferentes:

- evaluar la validez y significado del parámetro  $K_Q$  de la mecánica de fractura, usado para establecer el nivel umbral mínimo que podía ser garantizado y ver la aplicación de parámetros alternativos como  $K_{EE}$  usado junto con  $K_Q$

- estudio de la relación entre las características micro-físicas de aceros, valores de tenacidad de fractura y procesos de fabricación.

Para la mecanización de las muestras CT30 que serán sometidas a ensayo, se utiliza un dispositivo de CNC robotizado, instalado para obtener el acabado final de una muestra CT 30 en 45 minutos con agujeros, muesca y medida del esfuerzo.

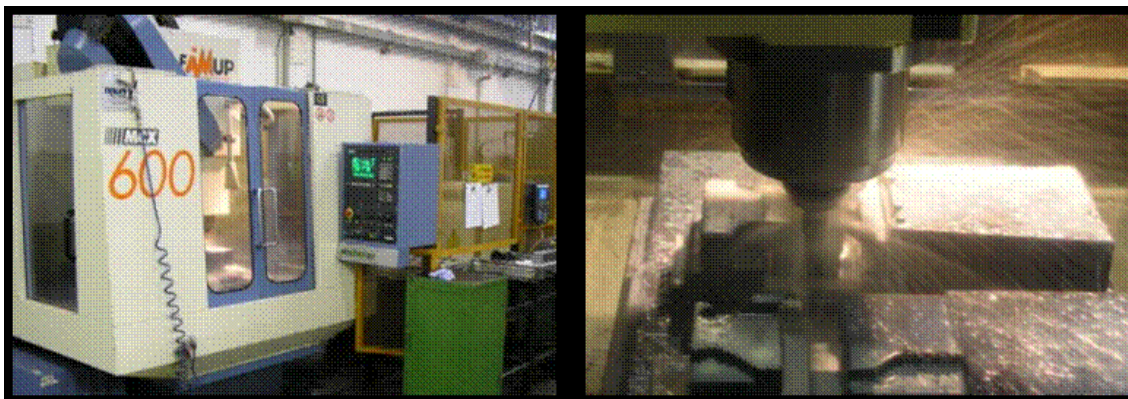


Figura 18: Dispositivo CNC robotizado para mecanización de muestras CT



Además del centro de mecanizado CNC, el laboratorio cuenta con cinco prensas, tres de 100 kN y una de 500 kN y otra de 2500 kN para llevar a cabo la ejecución del ensayo. Los dispositivos están equipados con programas de cálculo sofisticados para reducir el tiempo de resolución del ensayo.

Después de mecanizar la probeta CT 30 se hace la fisura en el grupo de tres equipamientos hidráulicos de 100 kN. El tiempo para fisurar una muestra CT 30 de acero clase R7T es de unos 40 minutos (figura 19).

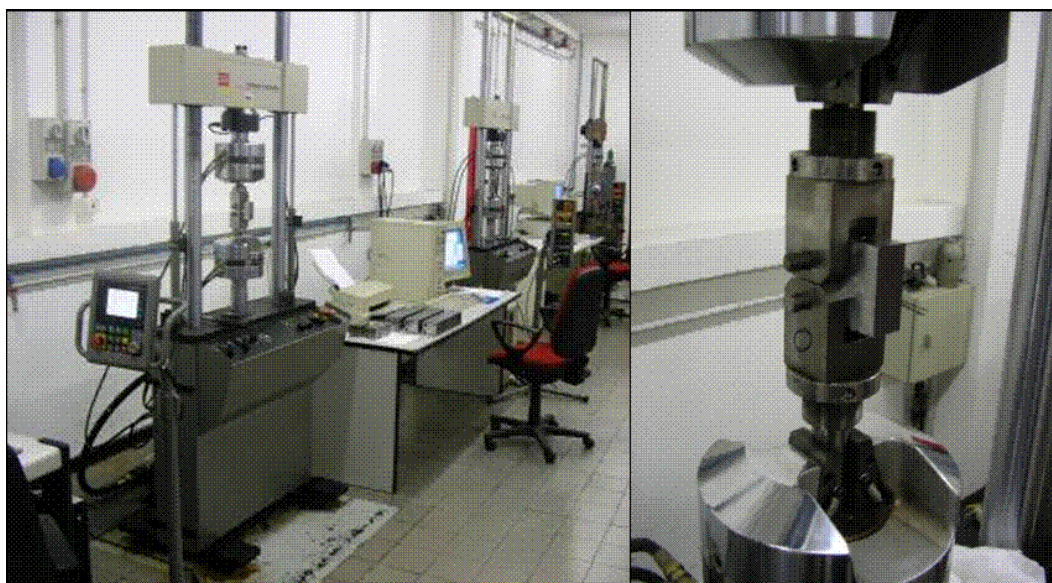


Figura 19. Tres máquinas de 100 kN para ensayo de tensión

Una vez mecanizada la probeta y realizada la entalla junto con la fisura por fatiga, la muestra está preparada para ser ensayada en la máquina de tensión de ensayo de 500 kN (figura 20) o en la de 2500 kN, cuyo software está completamente dedicado al cálculo de los parámetros de tenacidad de fractura acorde a los procedimientos demandados [45].

La capacidad de medida de la tenacidad de fractura de materiales y la colección propia de resultados ha ayudado al desarrollo de los procesos de fabricación de las ruedas.

En primer lugar, en el laboratorio metalográfico, han sido introducidos dispositivos dedicados a la medida de parámetros microestructurales (tamaño de grano, proporción de inclusiones, separación de fases) y a su relación con la mecánica de fractura.



Figura 20: Máquinas de tensión dinámica e hidráulica MTS de 500 kN y de tenacidad de fractura

Hay instalados dos dilatómetros para determinar las curvas CCT y TTT, para calibrar y establecer los parámetros correctos de forja y tratamiento térmico y mejorar los análisis evitando la presencia de bainita en ferrita y perlita. Gracias a estos dispositivos Lucchini Sidermeccanica obtiene una experiencia importante también en la proporción de inclusiones no metálicas, que están siempre presentes en el acero. La formación, crecimiento y evolución de inclusiones no metálicas dependen en gran medida de los procesos metalúrgicos primario y secundario. Por estas razones es importante identificar y clasificar el tamaño y tipo de las inclusiones para garantizar la creciente demanda de aceros limpios manteniendo estrechos controles en el proceso de producción del acero.

Se proponen dos diferentes propuestas en términos de proporción de inclusiones no metálicas:

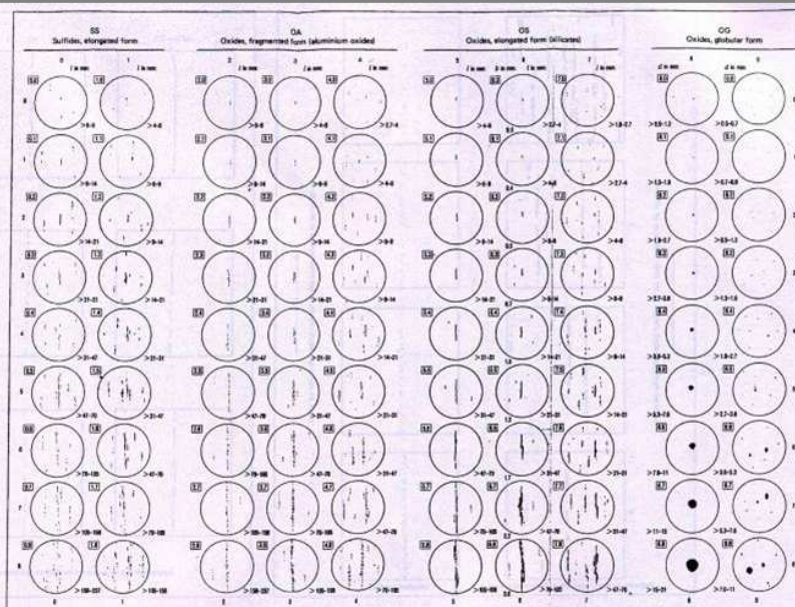
- proporción del peor campo o máximo tamaño, que es el *Método M* DIN 50 602 or ASTM E45 Método A, para medir los peores campos
- proporción de todas las inclusiones no metálicas desde un tamaño específico de grano (n) hacia arriba, llamado *Método K* DIN 50 602.

a)

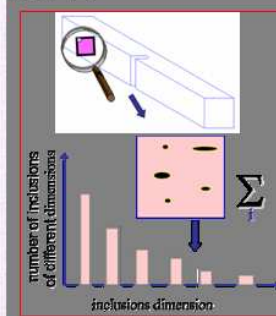
Diagram plate NO.1 DIN 50 602

UDC 669.14 : 620.186.14 DEUTSCHE NORM September 1985  
Metallographic examination  
Microscopic examination of special steels  
using standard diagrams to assess the  
content of non-metallic inclusions

DIN  
50 602



The sum obtained by counting inclusions weighted according to their area, starting from a specified size of inclusions upwards, is referred to an area of 1.000 mm<sup>2</sup>.



b)

The lowest rating number (n) that follows K, for example K0, K1, K4, etc., depends on the steelmaking process

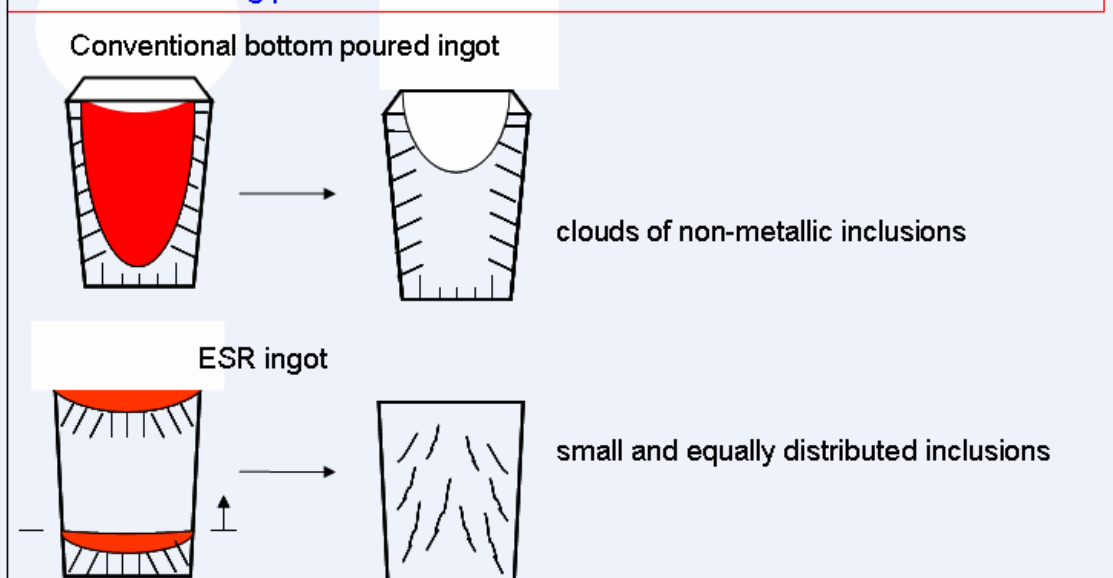


Figura 21: a) Diagrama usado para obtener la proporción de inclusiones no metálicas: K(n) método DIN50 602





b) La elección del número de proporción más bajo  $n$  depende principalmente del proceso de fabricación del acero

Esto se hace para:

- registrar todas las inclusiones no metálicas desde un tamaño específico ( $n$ ) hacia arriba
- obtener el grado de pureza de una pieza o una hornada por medio de un índice extenso  $K(n)$ , caracterizando el área de las inclusiones
- obtener, desde el tamaño fijado en adelante, un número proporcional al contenido de las inclusiones del acero.

Lucchini Sidermeccanica hace el cálculo desde el tamaño 0 hacia arriba del “valor característico  $K$ ”, llamado “ $k_0$ ” y se usa como un índice de calidad solo para información.

### **5.3.2. RELACIÓN ENTRE $K_{IC}$ Y LA MICROESTRUCTURA**

La composición química y las condiciones del tratamiento térmico de una rueda son especificadas por la clase de material. En los últimos 30 años han habido avances significantes en los procesos de fabricación de ruedas. Resistencia al desgaste, resistencia mecánica y coste, pueden influir en la elección del material de la rueda. De todos modos, la microestructura es responsable de propiedades mecánicas adecuadas, incluyendo la tenacidad de fractura. En lo que sigue se mencionan algunas relaciones importantes entre estructura y tenacidad de fractura.

#### **5.3.2.1. INCLUSIONES**

Para reducir o mejor evitar las inclusiones no metálicas es necesario realizar un análisis químico calibrado, ya que estas inclusiones pueden actuar como concentradores de tensión y como lugares potenciales de inicio de fisuras, reduciendo de esta manera la tenacidad de fractura. Además dichas inclusiones pueden también afectar el comportamiento frente a la corrosión. Normalmente las inclusiones no metálicas están presentes en los aceros R7T (figura 22). Después de un tratamiento metalúrgico por Ca, como se verá en los métodos de producción de acero, la inclusión pasa a tener forma esférica por la reacción con el Ca, pasando la mayoría de las inclusiones del baño a la escoria, (figura 23). La concentración de tensiones alrededor de la inclusión esférica se reduce de manera importante.

### 5.3.2.2. ESPACIO ENTRE CAPAS

En particular los espacios entre capas en una estructura perlítica pueden ser modificados con un adecuado tratamiento térmico y ayudado por elementos aleantes. Material de ruedas R7T tiene una microestructura de ferrita-perlita. Perlita está formada por láminas de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) y ferrita (hierro  $\alpha$ ). La cementita es dura y frágil, y la ferrita es blanda y dúctil. En las figuras 24 y 25 se muestra un ejemplo y también un incremento en la dureza con la variación del espacio interlaminar.

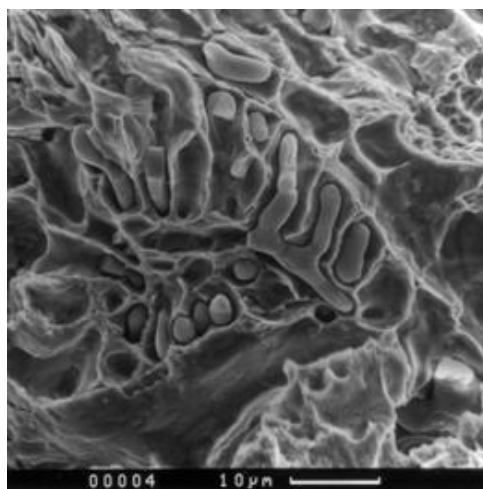


Figura 22: Superficie de una fractura conteniendo inclusiones de MnS. Acero calidad R7

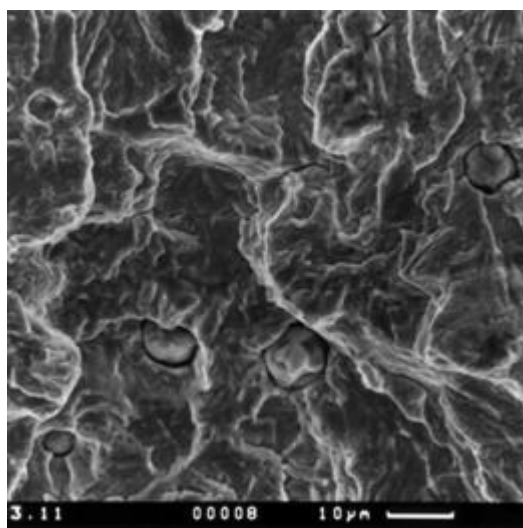


Figura 23: Inclusiones de MnS después de un tratamiento con Ca. Acero calidad R7

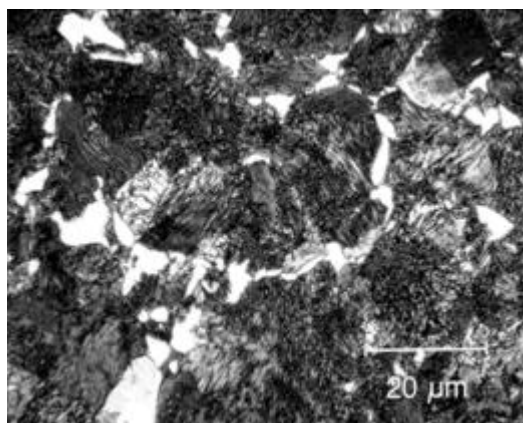


Figura 24: Perlita gruesa, 253 HV

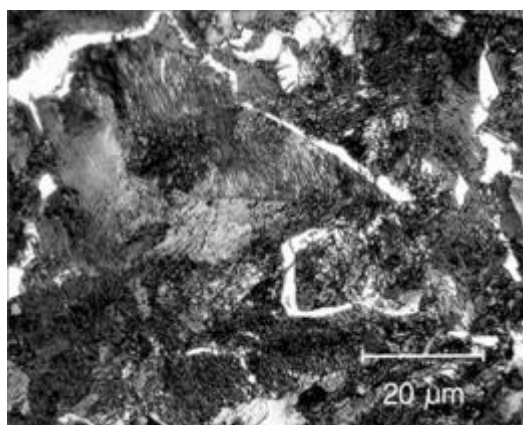


Figura 25: Perlita fina, 285 HV

#### **5.3.2.3. TAMAÑO DE GRANO**

Una apropiada microestructura perlítica homogénea con un fino tamaño de grano ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) es crucial para unas buenas propiedades mecánicas (figura 26)

#### **5.3.2.4. FERRITA EN BORDE DE GRANO**

Además de un tamaño de grano fino, una cantidad alrededor de 10 – 15 % de ferrita en los bordes de grano ayuda a mejorar la tenacidad de aceros R7.

### 5.3.2.5. POSIBLES PROBLEMAS

Para mejorar la tenacidad, en particular el impacto de su valor, se pueden hacer algunos tratamientos térmicos adicionales, que hacen variar la estructura de perlita como se muestra en la figura 27. Aquí las láminas de cementita se moldean a esferas y así influyen en la tenacidad pero reduciendo de manera importante la resistencia al desgaste y a las cargas. Por ello es necesario ajustar los tratamientos térmicos, para conseguir buena tenacidad pero sin reducir la resistencia.

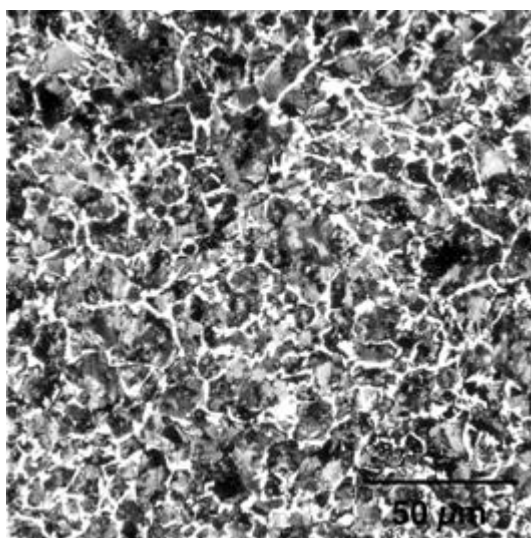


Figura 26: Microestructura homogénea ferrita-perlita de acero R7 con un tamaño de grano fino

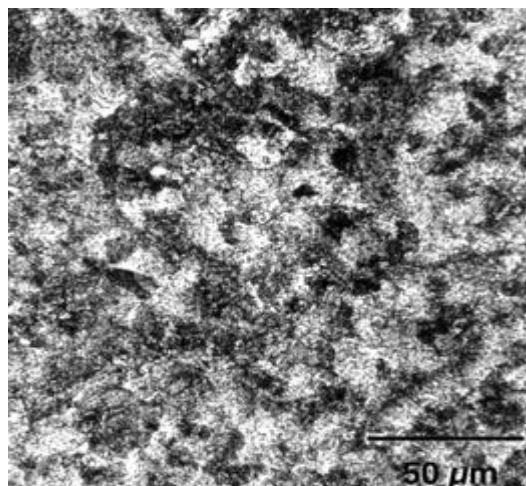


Figura 27: Microestructura de acero R7 con cementita

### 5.3.2.6. ESTRUCTURA DE BAINITA

Otro punto importante es la presencia de bainita. Hay buenas razones para no tener bainita en una llanta de rueda de acero R7T. Una es la reducción del comportamiento al desgaste como se ve en la figura 28 donde se observa el incremento del desgaste a igualdad de dureza cuando hay presencia de bainita. El ratio de desgaste para una dureza de 280 HB por ejemplo es completamente diferente y no deseado. En este caso la estructura perlítica resulta más adecuada, siendo muy importante la homogeneidad en toda la superficie circunferencial de una rueda.

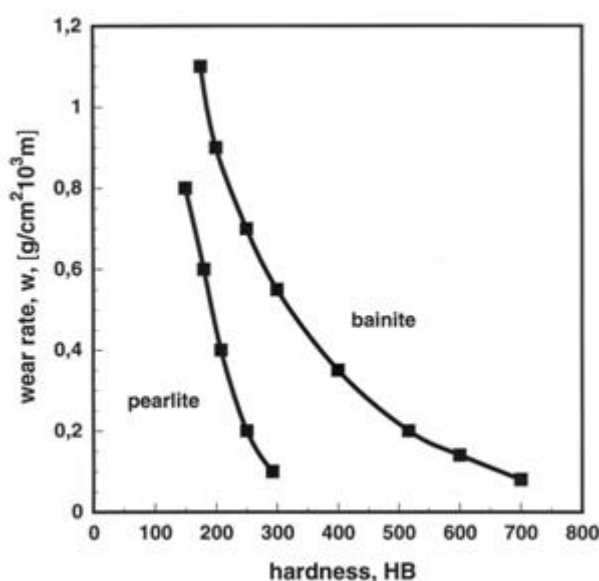


Figura 28: Desgaste de perlita y bainita.

### 5.3.2.7. HOMEGENEIDAD

Como se comentó anteriormente la homogeneidad no sólo de la microestructura si no también de algunas propiedades en toda la circunferencia de la rueda debe resultar la misma. Esto se muestra por las medidas de la tenacidad de fractura en la circunferencia de una rueda. Cada 60° se toman tres muestras juntas y se ensayan según las especificaciones. Los resultados en la figura 29 muestran la no homogeneidad y también el problema: Si uno toma los valores ILS 1.3, 3.1 y 5.1 todo está bien, pero con el valor ILS 4.1 nos encontramos con ciertos problemas.



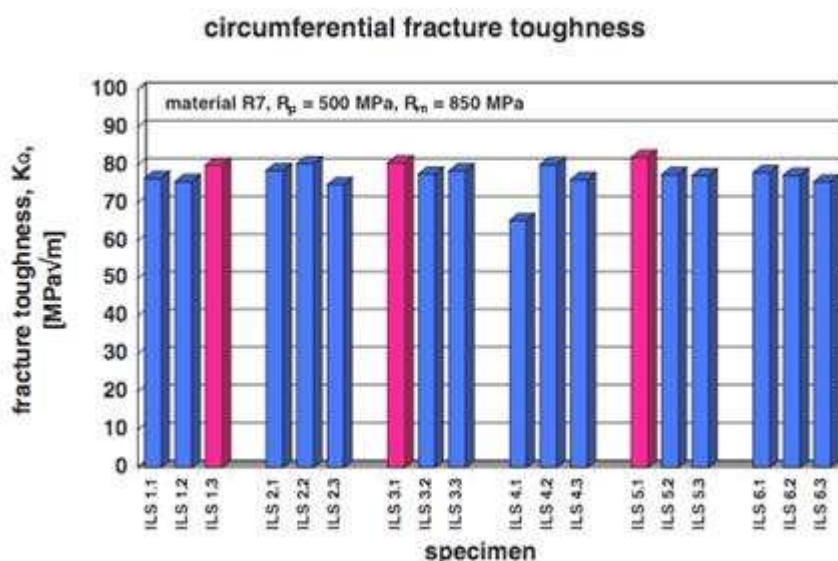


Figura 29. Tenacidad de fractura circunferencial de un acero calidad R7T.

## 5.4. RESULTADOS

Para poner mejor en evidencia la tendencia de los valores de la tenacidad de fractura de ruedas ferroviarias en distintos periodos, se representan en la figura 30 los valores estadísticos de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  de producción R7T, obtenidos y analizados en periodos diferentes:

- el primer periodo es el año 1986, antes de la introducción de  $K_Q$  en la norma UIC
- el segundo periodo es el año 1996, después de la introducción de  $K_Q$  en la norma UIC
- el tercer periodo es el año 2006, con la nueva producción de acero y tratamiento térmico.

La tendencia de los valores  $K_Q$  (figura 30 a) indica un aumento de un 6 % cada década, con una progresiva reducción en desviación típica, empezando desde un valor medio de  $K_Q = 80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un mínimo de  $K_Q = 65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  en 1986, hasta llegar en 2006 a un valor medio de la producción ER7T de  $K_Q = 91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , con un mínimo de  $K_Q = 84 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , siendo el valor mínimo mayor que los  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  exigidos por la norma.

El valor medio de  $K_Q$  en el periodo 1986–2006 se incrementa alrededor de un 13 %.

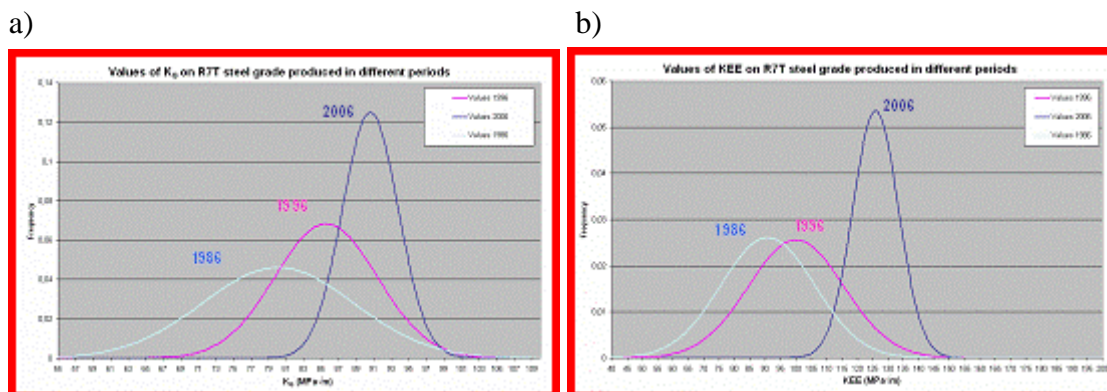


Figura 30 a) – b): Valores de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en acero clase R7T producido en tres periodos diferentes y representativos.

La tendencia de los valores medios de  $K_{EE}$  (Figura 30 b) indica un aumento de un 10 % entre 1986 y 1996, y un incremento de alrededor de un 26% entre 1996 y 2006, con una pequeña reducción en desviación típica.

$K_{EE}$  puede ser considerado un parámetro útil, alternativo a la integral-J ( $J_{IC}$ ), que nos da información en términos de mecánica de fractura en régimen plástico, que hasta el momento ha sido usado como un índice de calidad, para sólo información.  $K_{EE}$  combinado con  $K_Q$  puede proporcionar información adicional en la tenacidad de fractura de ruedas enterizas y puede ser fácilmente usado para definir un criterio más completo para validar los materiales durante la inspección. En cualquier caso, se empezó desde un valor medio de  $K_{EE} = 91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con un mínimo de  $K_{EE} = 67 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  en 1986, en 2006 el valor medio de la producción de acero de ruedas fue de  $K_{EE} = 126 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , con un mínimo de  $K_{EE} = 110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Los valores medios de  $K_{EE}$  en el periodo 1986-2006 se incrementan alrededor de un 47% en la producción de R7T.

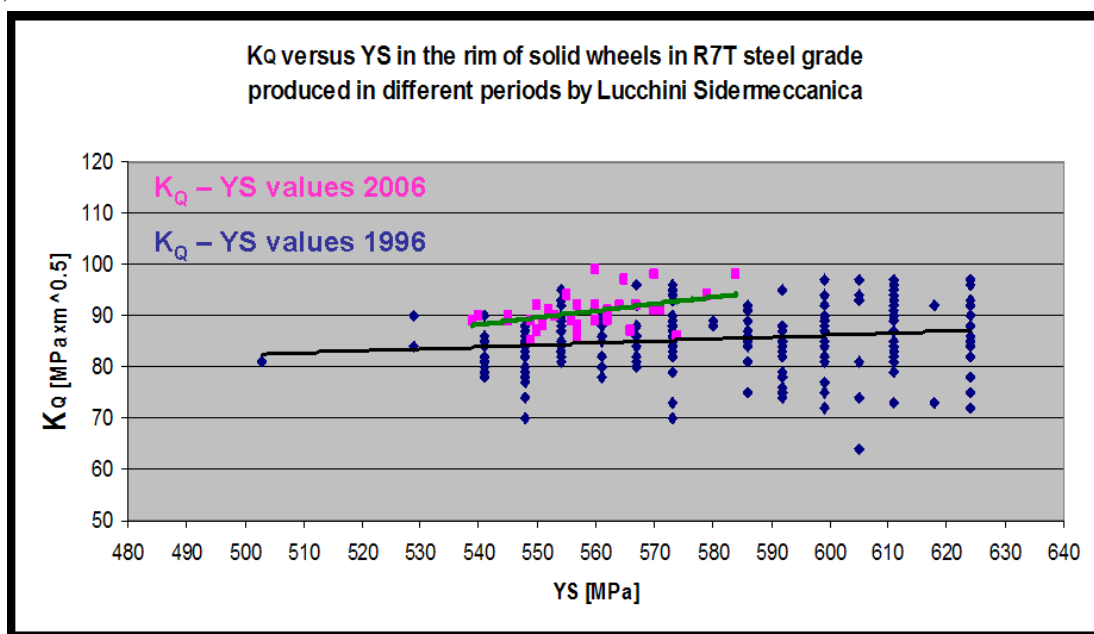
Un buen índice de calidad para las propiedades mecánicas de aceros es el producto de “límite elástico por tenacidad de fractura”. El significado de este índice de calidad es que un incremento en la tenacidad de fractura no debe disminuir el límite elástico del material.

Para comprender mejor la tendencia descrita en las figuras 30 a-b, se representan y se analizan valores estadísticos de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  de producción de R7T obtenidos en 1996 y en 2006 frente al límite elástico  $Y_S$  (Figura 31 a-b). Analizando la Figura 29 a-b se observa que de 1996 a 2006 aumenta el valor de la tenacidad de fractura de las ruedas, obteniendo valores mayores, dentro de un rango de valores más estrecho, consiguiendo mayor homogeneidad y todo con unos valores de  $Y_S$  mayores, obteniendo en este caso mayor resistencia y mejor tenacidad. Los valores de  $Y_S$  en la producción de R7T son



normalmente mayores que 520 MPa, como se requiere en la norma EN 13262, para los periodos de 1996 y 2006. Los valores de  $K_Q$  de 2006 están comprendidos en un rango menor que el correspondiente a 1996, consiguiendo además de mejor tenacidad por los resultados obtenidos, mayor homogeneidad en sus valores.

a)



b)

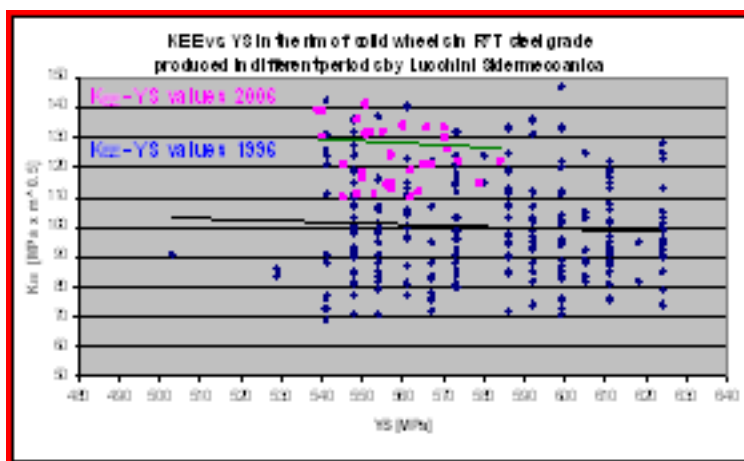


Figura 31 a) – b): Valores de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  frente a  $Y_S$  en acero clase R7T producidos en 1996 y 2006

Para medir la homogeneidad de los parámetros  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en la misma rueda enteriza R7T, pertenecientes a tres diferentes periodos de producción 1986, 1996 y 2006, se toman tres muestras CT 30 para cada posición angular de 60° acorde al esquema de la



## MECÁNICA DE FRACTURA APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS

### CAPÍTULO 5

figura 32 d. En cada gráfico se representan los valores medios de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  para cada posición angular y para cada década. Los resultados del primer periodo seleccionado (año 1986, antes de la introducción de  $K_Q$  en la norma UIC) son visibles en la figura 32 a, donde se observa que dichos valores son mayores de  $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , siendo el valor medio de cada posición angular algo menor de  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  en tres posiciones angulares diferentes de la rueda, para  $60^\circ$   $K_Q = 77 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , para  $180^\circ$   $K_Q = 79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y para  $240^\circ$   $K_Q = 79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

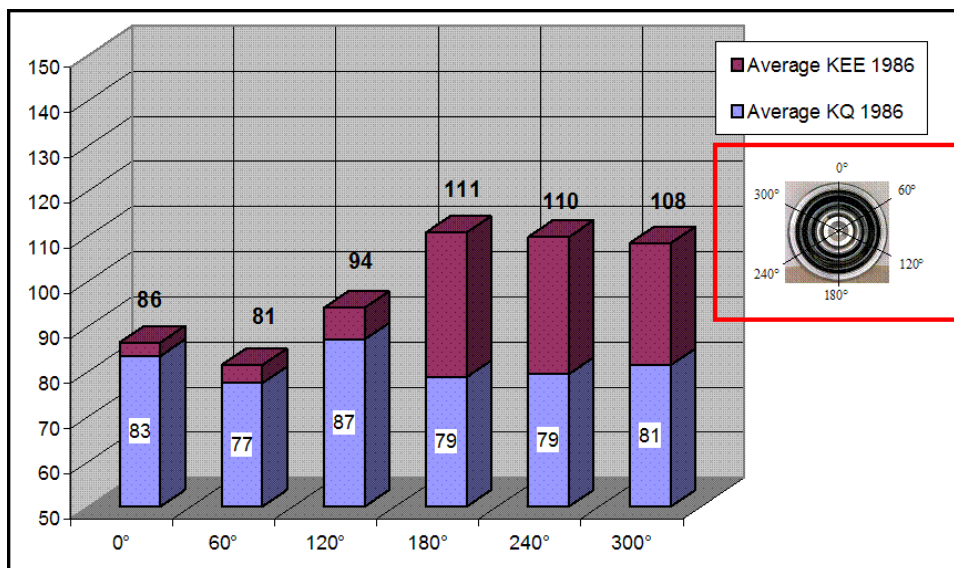
El valor medio de  $K_Q$  de los 18 ensayos realizados por rueda es  $81 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con el mínimo valor igual a  $71 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y el máximo  $91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (figura 33 a), todos los valores obtenidos están dentro de un rango de  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

El valor medio de  $K_{EE}$  de los 18 ensayos es  $98 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con el mínimo valor igual a  $74 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y el máximo  $125 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , todos los valores obtenidos están dentro de un rango de  $51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Se observa que valores bajos de  $K_{EE}$  están localizados en tres posiciones angulares  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $120^\circ$  (figuras 32 a y 33 b) representando prácticamente la mitad de la rueda.

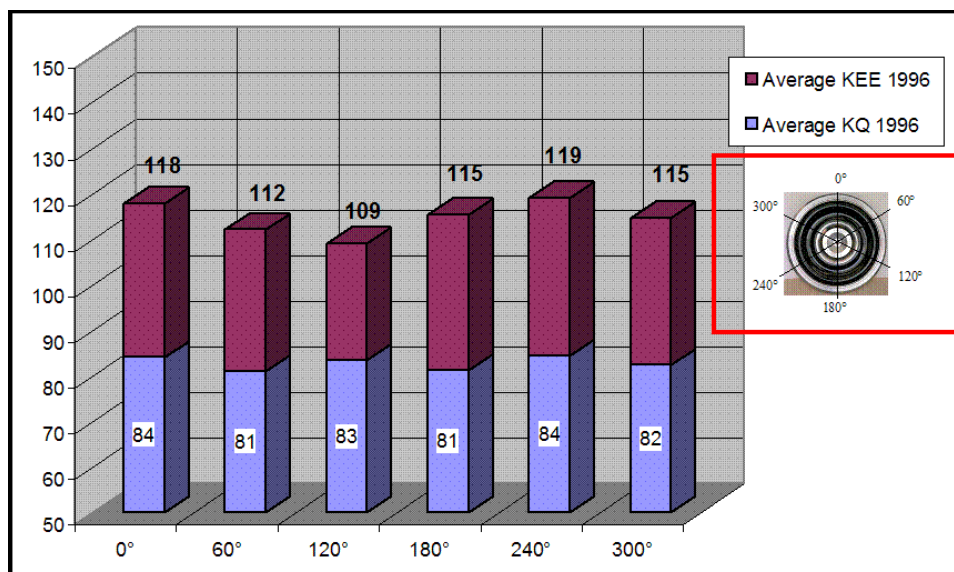
Los resultados del segundo periodo seleccionado (año 1996, después de la introducción de  $K_Q$  en la norma UIC) son visibles en la figura 32 b, tanto los valores para cada posición angular (ver figura 33 a) como los valores medios de cada posición. El valor medio de  $K_Q$  para los 18 ensayos es  $82.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con el mínimo valor igual a  $78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y el máximo  $92 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (figura 33 a), todos los valores obtenidos están dentro de un rango de  $14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . El valor medio de  $K_{EE}$  para los 18 ensayos es  $115 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con el mínimo valor igual a  $90 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y el máximo  $134 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , todos los valores obtenidos están dentro de un rango de  $44 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

Los resultados del tercer periodo seleccionado (año 2006, con el nuevo proceso de fabricación del acero y el nuevo tratamiento térmico) son visibles en la figura 32 c, tanto los valores para cada posición angular (ver figura 33 a) como los valores medios de cada posición. El valor medio de  $K_Q$  para los 18 ensayos es  $91 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con el mínimo valor igual a  $86 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y el máximo  $97 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , todos los valores obtenidos están dentro de un rango de  $11 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . El valor medio de  $K_{EE}$  para los 18 ensayos es  $131 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  con el mínimo valor igual a  $115 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y el máximo  $145 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , todos los valores obtenidos están dentro de un rango de  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

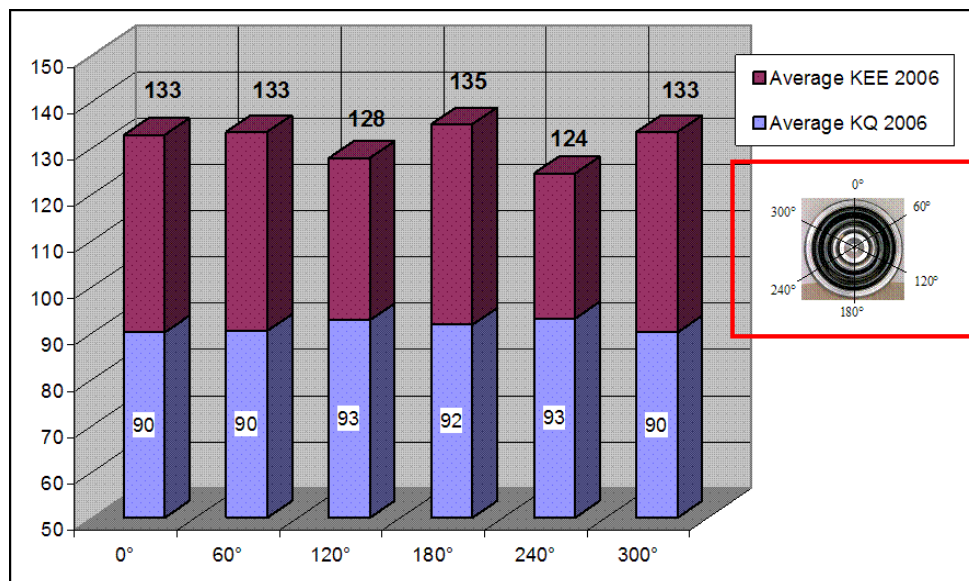
a) 1986



b) 1996



c) 2006



d)

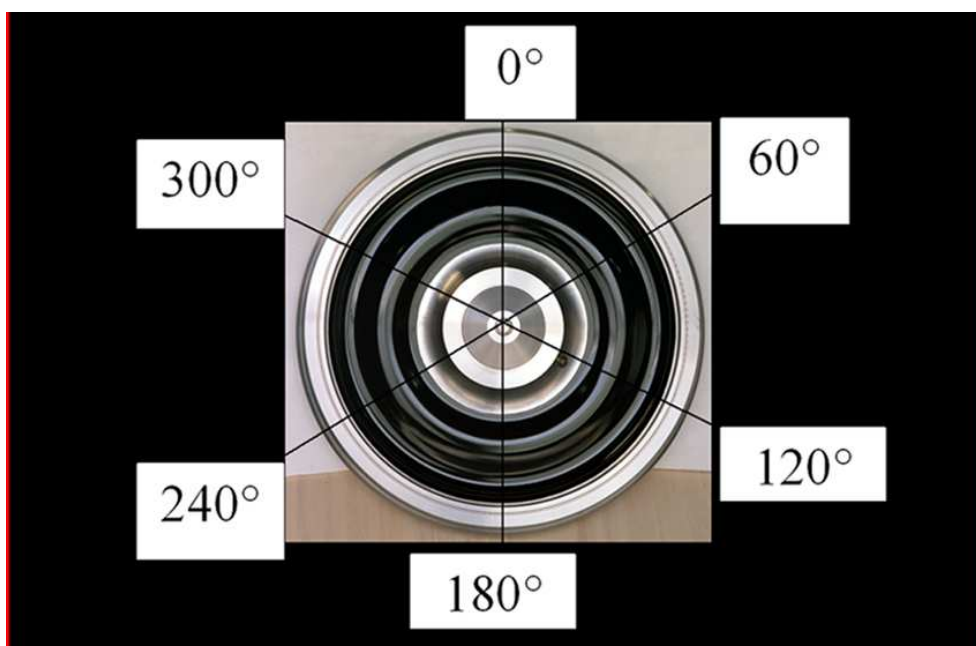
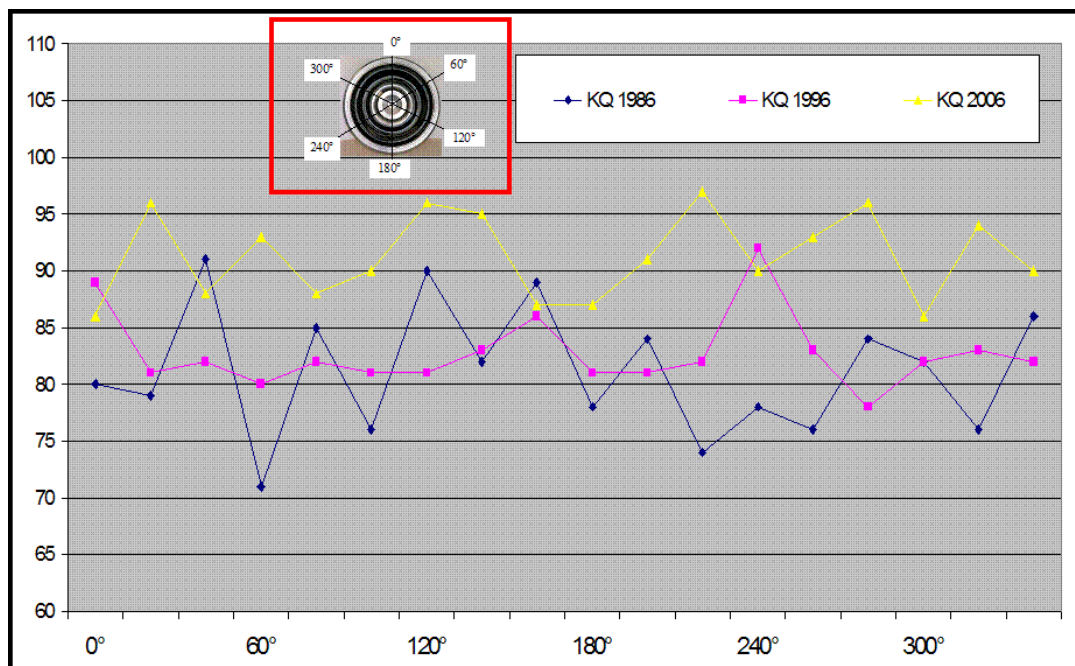


Figura 32: Valores de tenacidad de fractura  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en diferentes posiciones angulares de la misma rueda: a) acero R7T producido en 1986; b) acero R7T producido en 1996; c) acero R7T producido en 2006; d) posiciones angulares de la muestra CT 30 en la rueda: para cada posición angular, tres muestras han sido tomadas y el valor medio de las tres muestras es el que se representa.

a)



b)

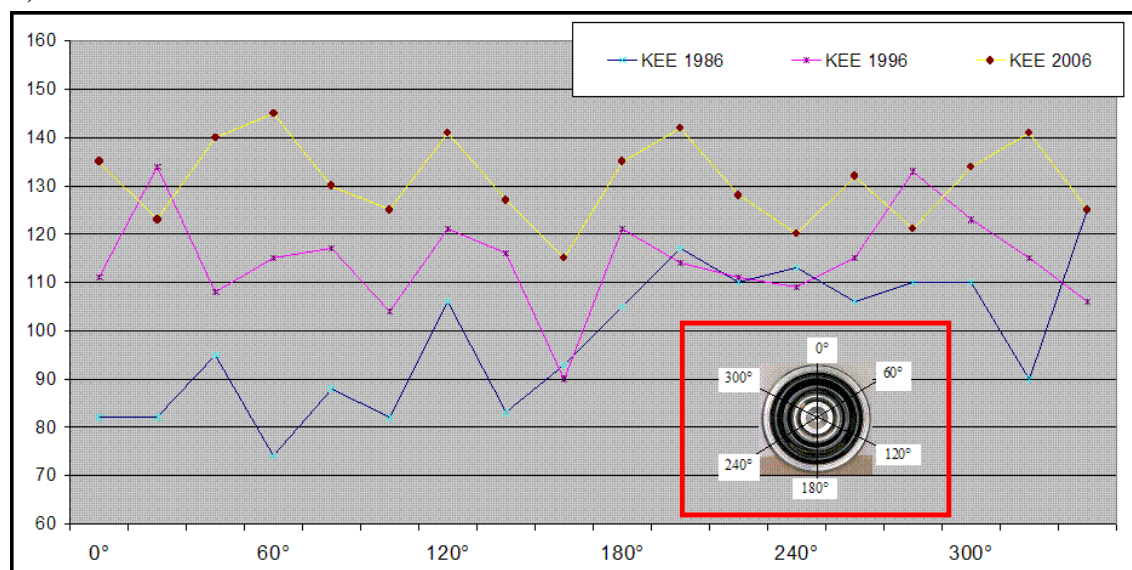


Figura 33 a) – b): Valores de tenacidad de fractura  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en diferentes posiciones angulares para una misma rueda.

Los resultados de mecánica de fractura representativos de la producción de tres décadas diferentes dan una buena idea de la tendencia de tenacidad de fractura, siendo muy importante relacionar parámetros microestructurales con la tenacidad de fractura. Por estas razones, actualmente se realizan unos exhaustivos análisis de materiales en términos de clasificación de inclusiones, para mejorar los procesos de producción del



## MECÁNICA DE FRACTURA APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS

### CAPÍTULO 5

acero, que es el aspecto fundamental para conseguir un control de la microlimpieza del acero. Las inclusiones no metálicas están siempre presentes en el acero por lo que es importante clasificar e identificar el tamaño y tipo de dichas inclusiones, para garantizar la creciente demanda en aceros limpios, teniendo por tanto bajo control el proceso de fabricación del acero.

La clasificación de inclusiones no metálicas en ruedas enterizas se obtiene normalmente con una muestra de cada hornada de ruedas, tomada de una rueda, seleccionada como muestra representativa. La superficie se limpia y la muestra, después de la preparación metalográfica de las superficies, se observa con un microscopio óptico de 100x. Dos propuestas diferentes en términos de clasificación de inclusiones no metálicas han sido desarrolladas, como se describe a continuación:

- 1) clasificación del peor campo o máximo tamaño Method M DIN 50 602
- 2) clasificación de todas las inclusiones no metálicas por encima de un tamaño específico (n), Method K DIN 50 602. Lucchini Sidermeccanica introduce este método en el control de la producción, partiendo del tamaño 0 en adelante del valor característico K.

Aunque será posteriormente cuando se detalle el proceso de producción de los aceros utilizados en la fabricación de ruedas ferroviarias, es en este apartado donde se va a establecer una relación directa entre limpieza de aceros y tenacidad de fractura. La formación, crecimiento y evolución de las inclusiones no metálicas depende en gran medida de los procesos metalúrgicos primario y secundario, el índice de calidad también llamado “k0” se utiliza para relacionar el proceso de producción del acero con la tenacidad de fractura. De esta manera se puede obtener desde el tamaño fijo hasta un número proporcional del contenido de inclusiones del acero, y este número proporcional es un buen valor informativo para representar el proceso de producción del acero y marcar los continuos progresos de microlimpieza del producto.

En la figura 34, se representa la medida del grado de pureza en diferentes periodos de producción de R7T. El valor medio de K(0) fue de 33 en 1986, 27 en 1996 y 18 en 2006. Además el valor medio de K(1) fue de 19 en 1986, 16 en 1996 y 11 en 2006. Podemos ver que K(4) es cero en las últimas dos décadas. Si se analizan estos valores, está claro que los valores de microlimpieza han mejorado, gracias a la fuerte reducción de sulfuros y óxidos, debido a la capacidad de los nuevos dispositivos de producción del acero. Esta situación se ve claramente en la figura 35, que representa la evolución de residuos en R7T. En efecto, el valor medio del contenido de azufre S en la producción de R7T fue: S = 0.012% en 1986, S = 0.010% en 1996 y S = 0.002% en 2006. También



destaca la tendencia del contenido de Mo como un indicador interesante de la variación realizada en los análisis químicos para obtener los valores de dureza demandados.

El contenido de  $O_2$  se reduce gracias a la adición de Al para su eliminación y el contenido de Ti también se reduce, ya que la existencia de nitruros de titanio es perjudicial en la tenacidad de fractura. En la figura 35 se representa la tendencia de gases en los tres periodos diferentes representados, se refleja una significativa reducción de  $N_2$ ,  $O_2$  y  $H_2$ . Si se representan los valores medios de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  frente a los valores medios de microlimpieza  $K(0)$  DIN 50 602 de los tres periodos diferentes 1986, 1996 y 2006, se obtienen los diagramas de la figura 36 a – b, que ponen en evidencia la relación entre microlimpieza y tenacidad de fractura.

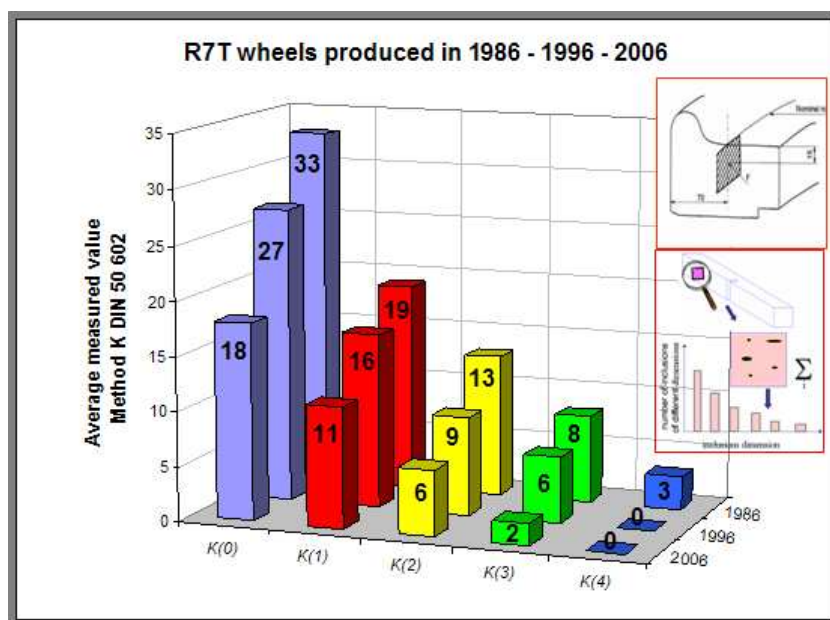
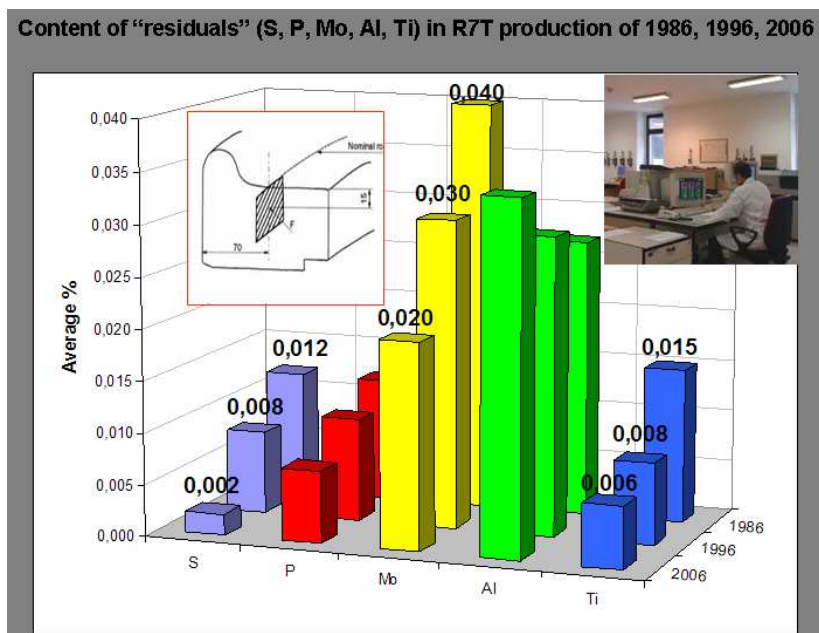


Figura 34: Medida del grado de pureza en diferentes periodos de producción.

Clasificación de todas las inclusiones no metálicas desde un tamaño específico (n) ascendente con Method K DIN 50602, ruedas de R7T producidas en 1986, 1996 y 2006.



a)



b)

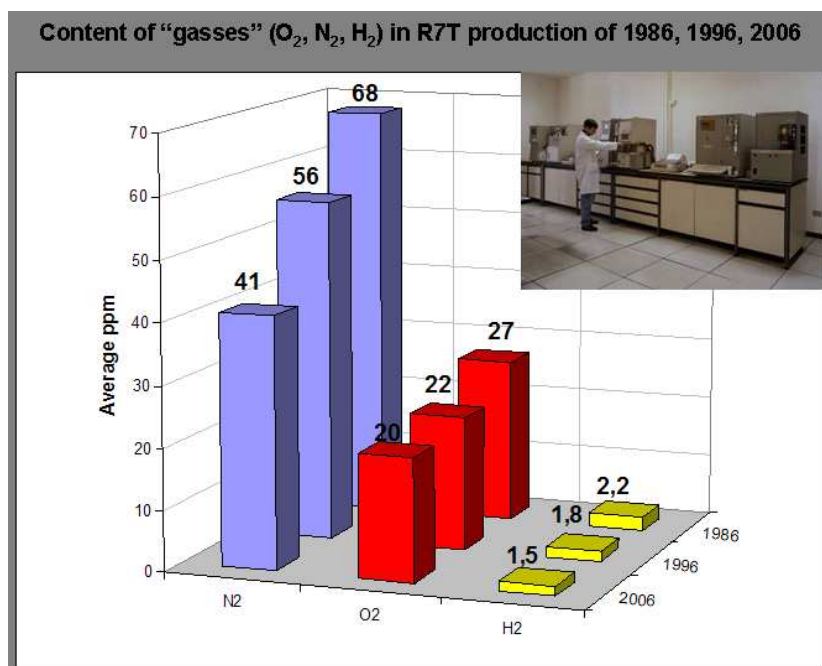


Figura 35 a) – b): Contenido de residuos a) (S, P, Mo, Al, Ti) y b) gases (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>) en clase de acero R7T en diferentes periodos de producción 1986, 1996 y 2006

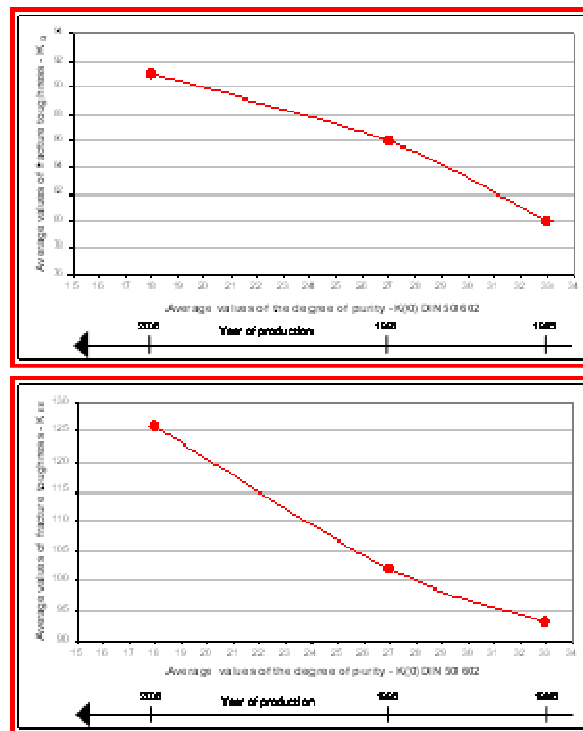


Figura 36 a) – b): Valores medios de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  representados frente a los valores medios de microlimpieza  $K(0)$  DIN 50 602 de tres periodos diferentes 1986, 1996 y 2006.

Prácticamente, se ve que:

- niveles altos de tenacidad de fractura se asocian normalmente con microestructura y microinclusiones del tipo mostrado en parte izquierda de la figura 37.
- niveles bajos de tenacidad de fractura corresponden a microestructura y microinclusiones similares a las mostradas en la parte derecha de la figura 37.

Es fácil notar el diferente grado de microlimpieza en los dos casos ilustrados. El acero de las ruedas en la parte izquierda ha sido producido acorde a procedimientos de producción apropiados que incluyen en particular desgasificación al vacío y refinado con una fuerte eliminación de S. Ruedas lado derecho, están fabricadas acorde con las normas UIC/EN, originadas por hornos eléctricos con un refinado y eliminación de S bajos. Las dimensiones de granos secundarios y el grado de microhomogeneidad y estructura son muy diferentes en los dos casos. Además, hay que prestar particular atención a los procesos de fabricación para obtener un buen nivel de microlimpieza, y a los tratamientos térmicos para obtener una estructura apropiada y homogénea, y un nivel apropiado y constante de tensiones internas.

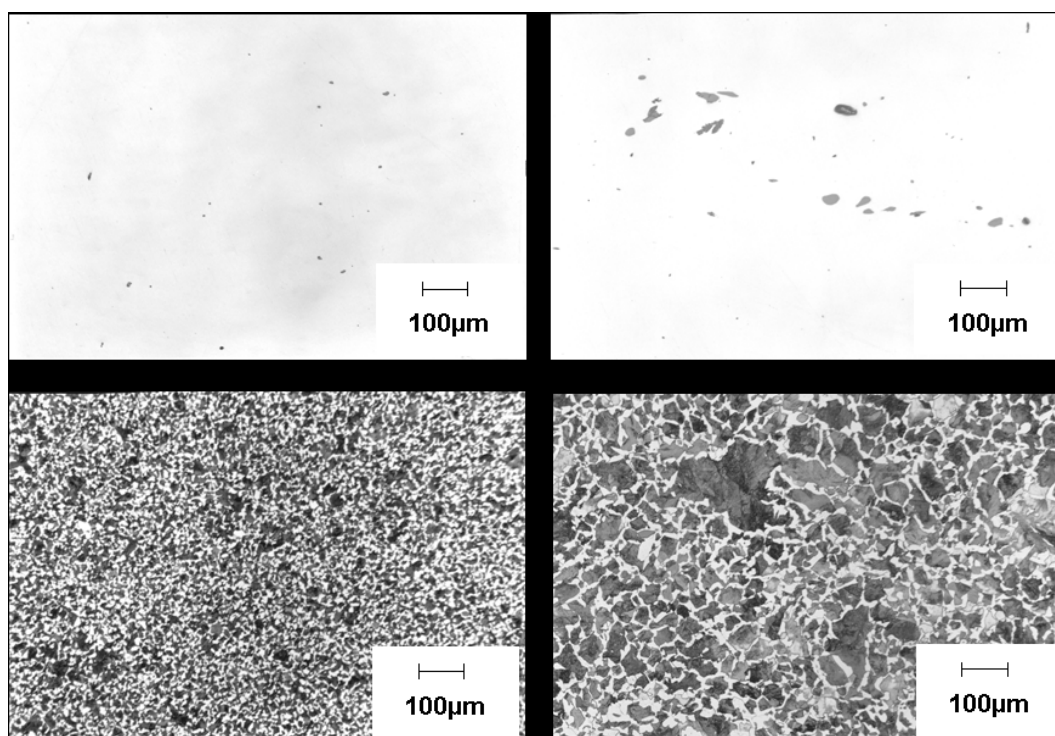


Figura 37: Ejemplo de relación entre tenacidad de fractura con los parámetros del proceso y microestructurales. Niveles altos de tenacidad de fractura son normalmente asociados con micro inclusiones y microestructura del tipo mostrado en el lado izquierdo. Niveles bajos de tenacidad de fractura corresponden a micro inclusiones y microestructura mostrada en el lado derecho.

Gracias a estos resultados podemos señalar la tendencia de la producción de aceros R7T e introducir otros índices de calidad para el proceso de producción como el producto de  $YS$  (límite elástico) con la tenacidad de fractura  $K_Q$ :  $YS \times K_Q$ . En resumen y para darnos una idea de la tendencia de los resultados recogidos de los dos periodos diferentes de producción (ensayos en la producción de 1996 y 2006) se representa en el diagrama de la figura 38. La posición de estos resultados en el diagrama demuestran que en la producción actual de ruedas enterizas de acero clase R7T, se han conseguido importantes mejoras.

Los resultados en la producción de R7T reflejados durante un largo periodo, confirman la capacidad para garantizar valores altos y homogéneos de características mecánicas y tenacidad en la mayor parte del tiempo, este es un resultado importante que muestra el grado de atención que los productores de ruedas han reflejado en la calidad y seguridad del producto con el objetivo de mejorar continuamente.

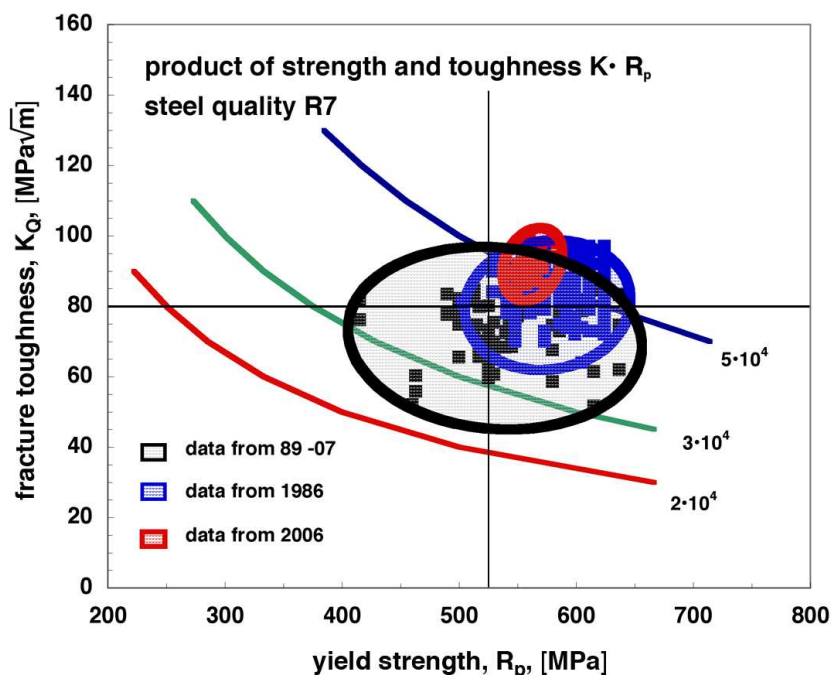


Figura 38: Localización de la producción de Lucchini Sidermeccanica del año 1996 (azul) y 2006 (rojo) en el área de acero R7.

La seguridad y fiabilidad de materiales debe ser mejorada, para ello se deben sugerir e introducir los indicadores representativos en la caracterización de materiales rodantes, ya que todas las características relevantes de servicio no son siempre consideradas en las normas del ferrocarril.

## 5.5. CONCLUSIONES

Los parámetros de tenacidad de fractura seleccionados  $K_Q$  y  $K_{EE}$  muestran que pueden también ser indicativos en la representación de actividades en procesos de producción de ruedas sólidas. Medidas de tenacidad de fractura de ruedas sólidas por el innovador parámetro  $K_{EE}$  combinado con  $K_Q$  y con el control de microlimpieza y microestructura pueden ser usados fácilmente para definir un completo criterio de aceptación del material durante la inspección.

Si se representan los valores medios de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  frente a los valores medios de micro limpieza  $K(0)$  DIN 50 602 de diferentes periodos de producción, se puede obtener



## **MECÁNICA DE FRACTURA APLICADA A RUEDAS FERROVIARIAS**

### **CAPÍTULO 5**

una buena relación entre micro limpieza y tenacidad de fractura en producción de ruedas R7T.

Por tanto, un buen camino para determinar la calidad de un material en producción es la introducción de un índice de calidad,  $YS \times K_Q$ , que une tenacidad junto con el límite elástico del material. Este índice de calidad ha sido tomado en cuenta por fabricantes de ruedas como Lucchini Sidermeccanica, observando que en su producción actual de ruedas obtiene unos valores de resistencia y tenacidad por encima de los mínimos exigidos.

Los resultados obtenidos demuestran que la capacidad de medir la tenacidad de materiales y una colección propia de los parámetros metalúrgicos ayuda al desarrollo de los procesos de fabricación de las ruedas.



**CAPÍTULO 6**  
**INCLUSIONES EXISTENTES EN**  
**ACEROS DE RUEDAS**  
**FERROVIARIAS**

**6.1. INTRODUCCIÓN**

Según investigaciones y experimentos realizados por miembros de compañías del Ingot Metallurgy Forum, el rechazo de hornadas de estas compañías debido a los defectos por inclusiones está en un rango entre 0.5 y 5 %. El coste correspondiente al rechazo es de unos 10 millones de dólares, considerando una producción anual de unas 700000 toneladas de acero en lingotes vertidos desde el fondo y una tasa de rechazo de un 1 % a 1500 dólares/tonelada. Debido a este rechazo por la mayor exigencia de aceros de alta calidad, estas compañías realizan un extenso trabajo de investigación de inclusiones en lingotes llenados desde el fondo.

## 6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las instalaciones propiedad de estas compañías incluyen Horno Eléctrico (Electric Arc Furnace EAF), una estación de Horno Cuchara (Ladle Furnace LF), un Desgasificador al Vacío (VD) y molde de los lingotes.

### 6.2.1. HORNO ELÉCTRICO (EAF)

La chatarra se carga dentro de cubetas y se introduce dentro del horno, se calienta y finalmente se funde al hacer pasar a través de ella una corriente eléctrica. Además se refina para eliminar C, P, Si y Mn usando una escoria oxidante, formada sobre el metal fundido mediante la adición de cal viva CaO y cal dolomítica CaO-MgO. El P, Si y Mn se eliminan de la masa fundida por su reacción con el oxígeno disuelto, formando óxidos que pasan a la escoria.

El C se elimina por la formación de gases, para favorecer la reacción se inyecta  $O_2$  en el horno, formándose CO y  $CO_2$ , gases que provocan un burbujeo del metal líquido, fomentando las reacciones metal-escoria.

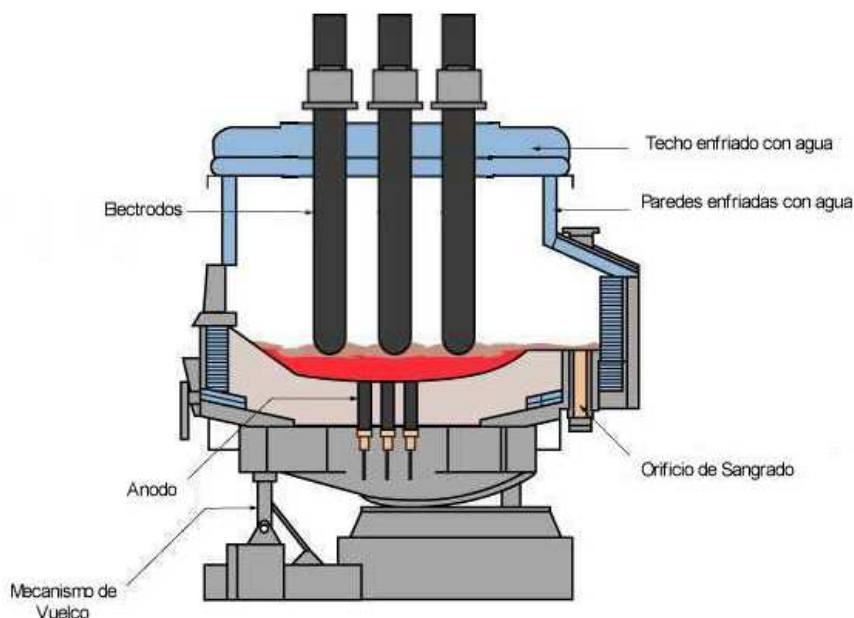


Figura 1. Horno eléctrico (EAF).

Por último en el horno se produce la defosforización. El fósforo en el metal fundido se oxida formando  $P_2O_5$ , pasando este óxido a la escoria, atrapado por el CaO.



### 6.2.2. CUCHARA (LF)

La carga fundida en el horno se vuelca a la cuchara donde se realizan las tareas de refinación y aleación del acero. El material se calienta con los electrodos, para mantener un control preciso de la temperatura y además se agita con gas Argón, que se introduce por la parte inferior de la cuchara a través de un tapón poroso, para así homogeneizar composición y temperatura del metal líquido. Esta agitación con gas Argón también favorece las reacciones metal-escoria.

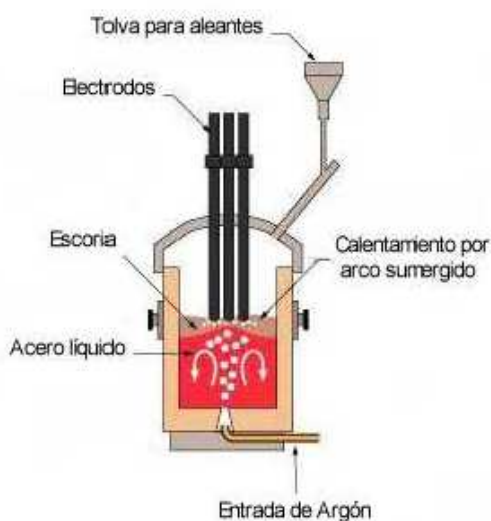


Figura 2. Horno cuchara (LF)

Dentro de la cuchara es donde se realizan la mayor parte de los procesos de limpieza del acero. Los procesos metalúrgicos de la cuchara están aplicados en la siguiente secuencia:

- Desoxidación profunda por la inyección de alambre de aluminio
- Desulfuración por el refino de la escoria
- Aleantes para la composición química final
- Modificación de las inclusiones de alúmina por adiciones de CaSi y/o CaO
- Eliminación por flotación de inclusiones no metálicas

La desoxidación es el tratamiento más importante realizado al acero. El objetivo es disminuir el contenido de O disuelto, ya que este puede provocar porosidad y formar inclusiones durante la solidificación. El agente desoxidante se suele agregar mayoritariamente durante la transferencia de material del horno a la cuchara, para así aprovechar la alta turbulencia existente y favorecer la mezcla con el material fundido.



## **CAPÍTULO 6**

### **INCLUSIONES EXISTENTES EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ACERO**

Posteriormente se añaden más desoxidante para ajustar la composición y controlar el O disuelto.

El agente desoxidante debe tener una alta afinidad por el oxígeno, siendo el aluminio (Al) es utilizado con mayor frecuencia por obtener en el baño bajos contenidos de O (desoxidación profunda) con buen rendimiento industrial. El producto formado es la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con un punto de fusión de 2100 °C, temperatura mayor que la temperatura de fusión del acero, 1600 °C.

En los aceros tratados con Al, la desoxidación es la fuente más importante de inclusiones. Estas inclusiones a medida que avanza el proceso se aglomeran, coagulan y flotan a la superficie, por tener menor densidad que el acero. La velocidad de eliminación de las inclusiones de alúmina depende fundamentalmente de la aglomeración y coagulación entre ellas, ambas favorecidas por el agitado con argón, aunque no es posible eliminarlas totalmente.

Otro proceso importante es la desulfuración. Durante la solidificación de la masa fundida, el S puede reaccionar con el Fe formando FeS con punto de fusión de 1188°C. Estos precipitados son líquidos a la temperatura de fusión del acero, por tanto para facilitar su eliminación pasando a la escoria, se añade Mn al acero. Las inclusiones de MnS formadas tienen un punto de fusión superior al del acero, permaneciendo sólidas y así poder ser eliminadas al igual que la alúmina.

#### **6.2.3. DESGASIFICADOR AL VACÍO (VD)**

El baño de acero se somete a un proceso de desgasificación al vacío ya que, además del oxígeno, en el acero líquido están disueltos otros gases, particularmente H y N. Al igual que ocurre con el oxígeno, los gases H y N producen porosidad en el acero una vez ha solidificado, por tanto es necesaria su eliminación para mejorar sus propiedades mecánicas. La técnica utilizada consiste en utilizar un desgasificador.

La cuchara se introduce dentro de un tanque donde se realiza vacío, llegando a presiones de unos pocos milibares. El agitado de la masa con gas Argón a través de los tapones porosos localizados en el fondo de la cuchara, favorece la desgasificación.

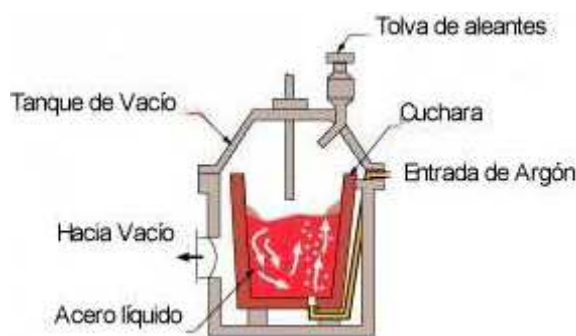


Figura 3. Desgasificador al Vacío (VD)

Los gases disueltos en el acero difunden con hacia las burbujas de argón, que flotan hasta la superficie donde escapan a la atmósfera. El flujo de gas necesario para eliminar los gases H y N disminuye considerablemente cuando decrece la presión exterior. Es por esta razón que se usan equipos de vacío para la desgasificación.

Debido a las bajas presiones durante la desgasificación, el flujo de argón produce una alta interacción en la interfase metal-escoria, fomentando las reacciones entre ambas fases pudiendo afectar la población inclusionaria tanto en densidad como en composición.

El último paso de limpieza del acero se realiza también en la cuchara tras su salida del desgasificador, donde se realiza el tratamiento con Calcio y se hace el ajuste necesario de aleantes. La limpieza de las inclusiones citadas anteriormente no es total, quedando en la masa fundida inclusiones sólidas, perjudiciales en las propiedades del acero.

La fuente principal de inclusiones en el acero es la alúmina. A medida que se agrega el Ca en el acero líquido a través de un tubo de acero en forma de polvo de CaSi compactado, el Ca se disuelve en el acero líquido modificando las inclusiones de alúmina. Esta modificación permite obtener inclusiones líquidas, teniendo éstas mayor facilidad para coagularse y flotar hacia la superficie.

Por otro lado, el tratamiento con calcio también provoca la modificación de los sulfuros en el acero. El calcio disuelto en el acero puede reaccionar en forma directa con el S formando CaS. La formación de CaS reduce la posibilidad de formación de MnS. Este CaS puede también reaccionar con inclusiones ya modificadas de alúmina con CaO, quedando los sulfuros CaS y MnS rodeando a la inclusión modificada  $Al_2O_3$ -CaO.

### 6.3. INCLUSIONES EN EL ACERO FUNDIDO

Diversos estudios han investigado las inclusiones existentes en el acero fundido tomando muestras de acero durante su proceso de fabricación, relacionando la existencia de estas inclusiones con la limpieza del acero. En este apartado se va a considerar un estudio realizado sobre dos grados diferentes de aceros fundidos cuyas composiciones se muestran en la tabla 1. Las muestras se toman durante el tratamiento en la cuchara del horno en las siguientes partes del proceso:

- Después de la aplicación de alambre de Al (A)
- Antes de la aplicación de CaSi (B)
- Después de la aplicación de CaSi (C)
- En la salida de la masa fundida de la cuchara (D)

	C	Mn	Si	P	S	Al	Ca	O	N
Grade A	0.17	1.20	0.25	0.010	0.012	0.025	0.0025	0.0045	0.0070
Grade B	0.08	0.44	0.23	0.010	0.012	0.030	0.0030	0.0040	0.0075

Tabla 1. Composición química de las calidades de acero estudiadas en porcentaje.

Las muestras del acero fundido se toman con muestreadores como el de la figura 4. El molde donde se enfría la muestra, está dentro de un tubo de cartón prensado y conectado al exterior a través de un tubo cerámico, por el cual llega el acero líquido al molde. El tubo cerámico está protegido por un tapón cerámico que lo une con el tubo de cartón prensado. Existen dos capuchones de protección de chapa de acero, una para el tubo cerámico y otra para todo el conjunto de toma de muestras, para evitar la toma de escoria en la muestra cuando se introduce en el acero fundido.

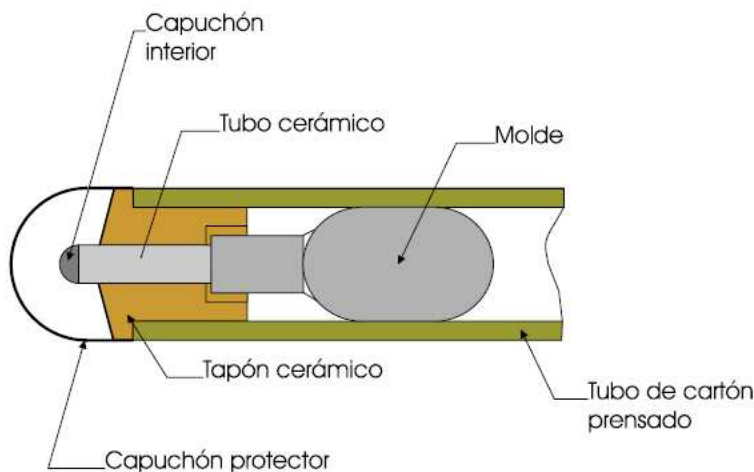


Figura 4. Dispositivo para la toma de muestras

El muestreador se introduce verticalmente dentro de la cuchara mediante un dispositivo automático que garantiza velocidad y profundidad constantes para todas las muestras. Debido a los capuchones protectores la escoria no pasa al molde cuando el muestreador la atraviesa para llegar al metal fundido. Las protecciones de chapa de acero se funden una vez dentro, llenándose el molde de acero debido a la presión ferroestática. Tras el llenado, se retira el muestreador extrayendo la probeta del molde.

Las probetas deben ser preparadas para su observación. Se rectifican ambas caras de la probeta para así obtener dos superficies planas paralelas. Una vez rectificada la muestra, se pule una de las superficies usando lijas de distinta granulometría desde la más gruesa a la más fina.

Las inclusiones no metálicas se observan en las superficies metalográficas bajo microscopio óptico metalográfico, determinando la composición de alguna de ellas utilizando técnicas de energía dispersiva (EDS). Se toman 6 muestras en cada una de las 4 partes del proceso mencionados anteriormente como A, B, C y D donde se determina su contenido en inclusiones. De las 6 muestras tomadas en cada parte, las 4 primeras son de acero de calidad A y las 2 restantes de acero de calidad B, según se indica en la figura 5. Los cambios en los contenidos de inclusiones durante su tratamiento en la cuchara están reflejados en la figura 5.

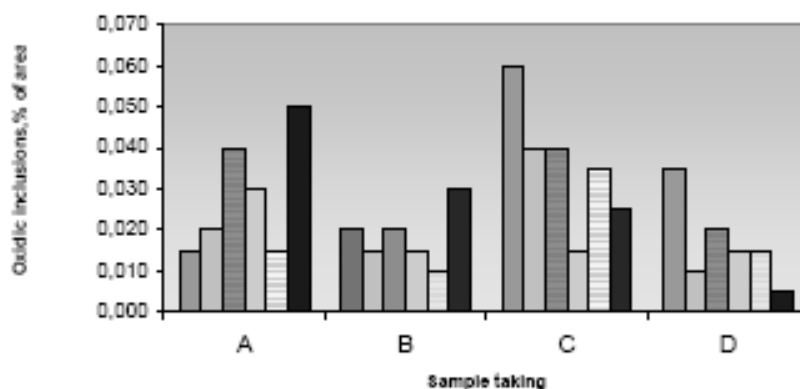


Figura 5. Cambios en los contenidos de inclusiones durante el tratamiento de la cuchara.

Después de la aplicación de Al (parte A del proceso), las inclusiones de alúmina que se formaron por la reacción del aluminio con el oxígeno, se disuelven en el acero fundido. Las partículas de alúmina tienen la forma de cualquier partícula individual o de racimos de partículas muy pequeñas (figura 6), permaneciendo en estado sólido debido a su mayor temperatura de fusión que el acero.

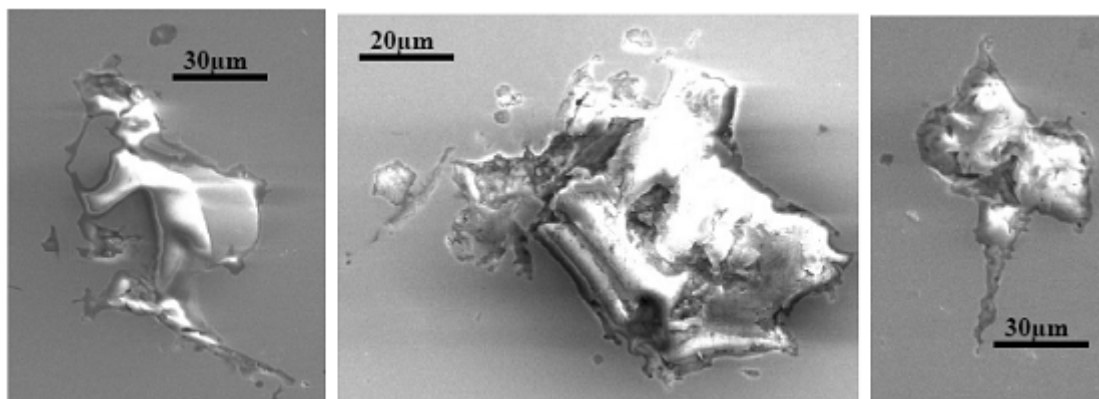


Figura 6. Inclusiones de alúmina pura

La agitación del baño de acero por las burbujas de gas Argón, supone la eliminación de muchas partículas de alúmina a la escoria, como claramente se demuestra en la figura 5 (parte B del proceso).

La adición de perfiles de CaSi (parte C del proceso), hace que la composición y morfología de las inclusiones de alúmina que permanecían en el baño cambie. Por la reacción del calcio con la alúmina se forman inclusiones de alúmina y calcio, que debido a su baja temperatura de fusión se convierten en líquidas dentro del acero fundido, con forma globular. Debido a su forma flotan fácilmente hacia la parte superior del baño, pasando a la escoria como se ve en la figura 5 (parte D del proceso). La reacción de la alúmina con el calcio no es completa, por tanto quedan partículas del interior de la alúmina sin reaccionar, como se ilustra en la figura 7. Además por la adición de Ca, se forman CaS que a su vez reacciona con las inclusiones de alúmina y calcio, eliminando de esta manera el S presente en el baño.

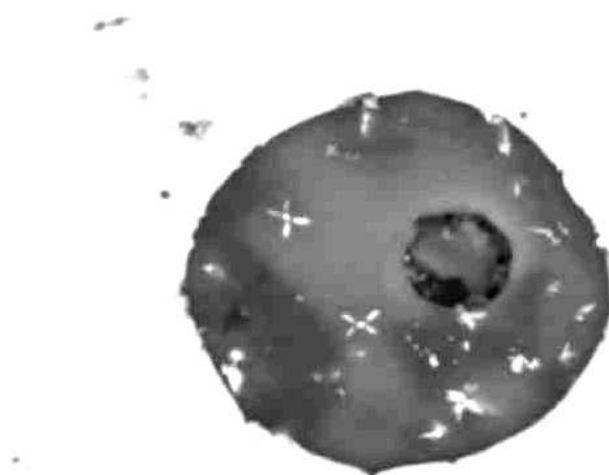


Figura 7. Inclusión de alúmina y calcio en la muestra de acero

Un aspecto muy importante en el proceso de limpieza del acero, es el burbujeo con gas Argón. Por la adición de los elementos y por la introducción del gas Argón a través del tapón poroso, se consigue una reducción importante del porcentaje de inclusiones existentes en el baño, como se muestra en la figura 5 en la parte D del proceso.

Otra prueba dentro de este estudio consiste en buscar la influencia del tiempo de burbujeo con gas Argón en la tasa de eliminación de las inclusiones no metálicas del acero fundido. Para ello se estudian seis muestras de acero de calidad A. Todas las muestras se tratan en la cuchara en la misma secuencia anteriormente descrita, con un tiempo de burbujeo en el último paso (parte D del proceso) de 12 minutos. Las muestras para cada colada se toman después de los minutos 4, 8 y 12 del burbujeo con gas. La cantidad de inclusiones de óxidos se determina con un microscopio óptico metalográfico.

La figura 8 presenta la influencia del tiempo de burbujeo de gas Ar en la cantidad de inclusiones de óxidos presentes en el acero fundido. Se observa que a partir de los 8 minutos de burbujeo con gas, la presencia de inclusiones permanece prácticamente constante, considerando este tiempo de 8 minutos como tiempo suficiente para conseguir una purificación satisfactoria del acero.

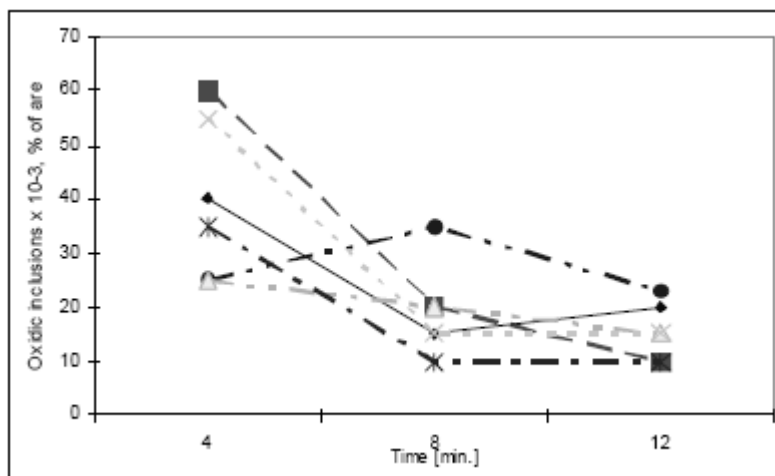


Figura 8. Cambios en los contenidos de inclusiones de óxidos durante la aplicación de gas Argón

Los tiempos de burbujeo para cada parte del proceso de fabricación del acero quedan recogidos en la siguiente tabla.





	Ar quantity, $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$	Time of bubbling, min
Deoxidation, desulphurization	300	20 – 25
Chemical homogenization	120 – 130	10 – 20
Light bubbling	25	8

Tabla 2. Regímenes de burbujeo con gas Argón

Del estudio realizado sobre muestras de acero tomadas de la cuchara, para determinar la relación entre limpieza metalúrgica y existencia de inclusiones, se extrae:

- La inyección de alambre de Al para eliminar el O disuelto, conlleva la formación de inclusiones de alúmina. Una agitación energética del baño por burbujas de gas Ar supone la flotación de las inclusiones a la superficie cubierta por la escoria.
- La adición de CaSi modifica las inclusiones de alúmina por la reacción entre ambos, quedando la nueva inclusión con forma globular que fácilmente pasan a la escoria por flotación, ayudado por el gas Argón.
- Se produce la eliminación del S presente en el acero por la reacción de éste con las inclusiones de alúmina y óxido de calcio.
- Se estudia la influencia del tiempo de burbujeo con el gas Ar en la tasa de eliminación de las inclusiones, determinando un tiempo de 8 minutos para la purificación satisfactoria del acero líquido.

## 6.4. INCLUSIONES EN LINGOTES SOLIDIFICADOS

Con el anterior estudio, se han visto los tratamientos realizados en la producción de acero para la eliminación de las inclusiones no metálicas. Dado que su eliminación no es del todo completa con los tratamientos realizados, se debe conocer que contenido de inclusiones existe en el acero solidificado. Para ello, se han realizado ensayos industriales sobre muestras de material tomadas desde barras de lingotes, conducidos por Ellwood Quality Steels Co.



### 6.4.1. PRODUCCIÓN DE LINGOTES Y TOMA DE MUESTRAS

El acero fundido después de su tratamiento, sale de la cuchara a través de una puerta corredera situada en el fondo. El porcentaje de apertura de la puerta es del 50 % aproximadamente para evitar que se produzcan reoxidaciones por la entrada de oxígeno al acero fundido. El acero fundido pasa desde la cuchara a una trompeta, la cual conecta con varios conductos, 7 – 8 conductos, llegando cada conducto a un molde que dará forma al lingote. En la tabla 3 y figura 9 se muestran las composiciones del molde y refractarios, incluyendo el forro de la cuchara, arena de relleno, trompeta y conductos de llenado de moldes, desde su fondo.

	Ladle Lining						Nozzle Sand	Trumpet & Runner		Mold Flux
	Wall	Bottom	Well block	Inner Nozzle	Slide gates	Collector Nozzle		Brick	Filler	
SiO <sub>2</sub>	0-5	0.8	0.10	1.00	0.5	10-13	27.6	50.8	0.9	29.0-36.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-5	0.5	91.22	94.00		83-87	11.8	44.5	0.8	15.0-21.0
MgO	80-100	40.1	6.01	Trace	97.0		7.1	0.1	37.7	<2.0
CaO		57.6	2.51	Trace	1.8		0	0.1	55.6	1.0-5.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	0.9	0.03		0.2	1-2	18.6	1.0	4.2	5.0-11.0
Na <sub>2</sub> O			<0.02	0.20		<1		0.47		4.0-6.0
K <sub>2</sub> O										<2.0
TiO <sub>2</sub>			0.02			1-3		2.1		<1.5
ZrO <sub>2</sub>				2.50			0			
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							32.9			
MnO										<1.0
F										<0.5
C <sub>total</sub>	5-15						0.6			23.0-26.0

Tabla 3. Composición de paredes y forros usados para cuchara, trompeta, conductos y molde del lingote.

Los lingotes de este estudio son redondos con un diámetro de 330 mm, 4.7 m de altura y 2.91 toneladas de peso.

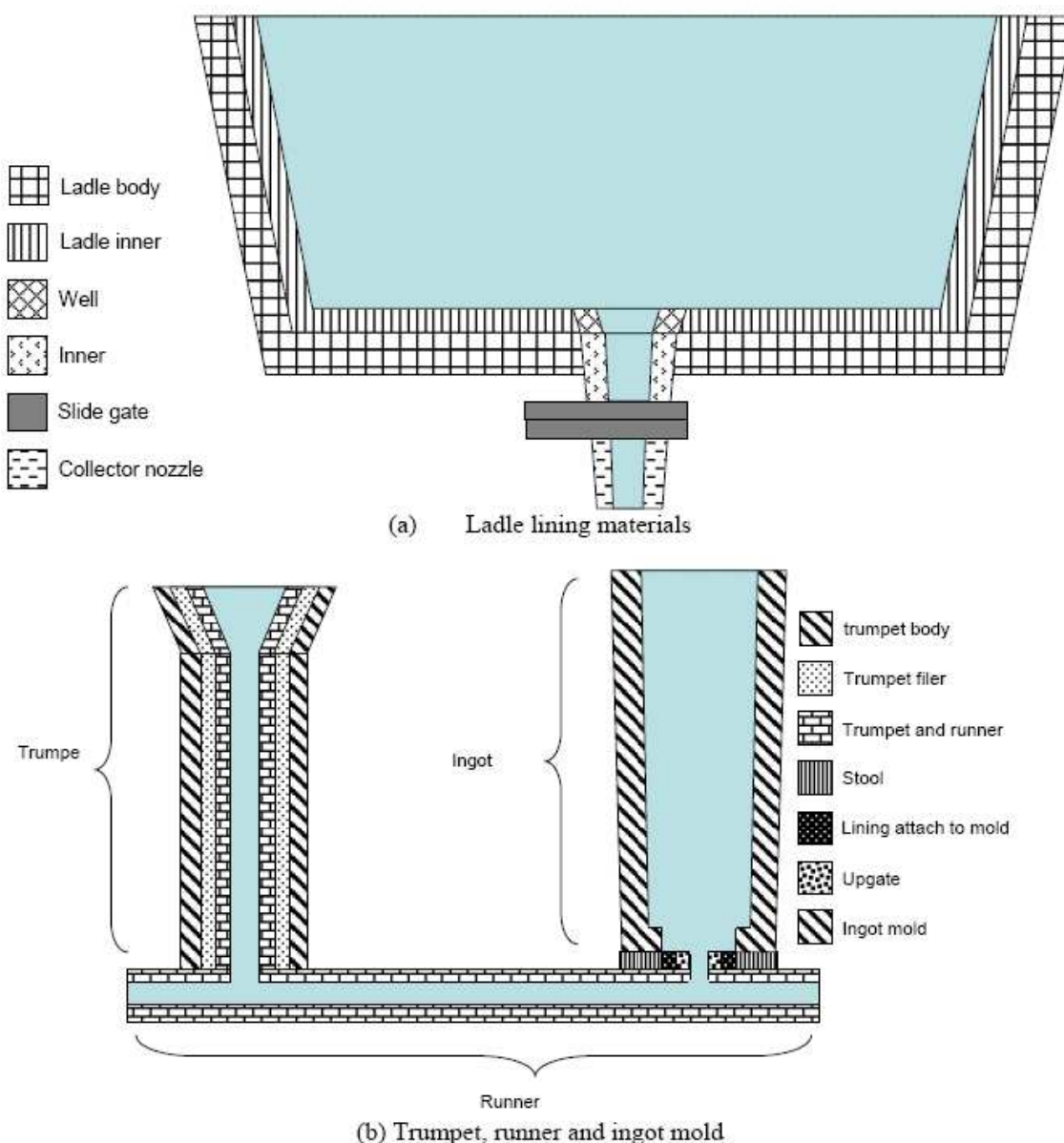


Figura 9. Proceso esquemático de llenado de lingotes desde el fondo.

Después de la solidificación final, se toman las muestras del lingote seccionándolo por varias partes. La figura 10 refleja como se obtienen las muestras, donde “A” indica la dirección del conducto que llega al lingote desde la trompeta. En total, se toman 54 muestras de acero de 25.4 mm de espesor examinadas para detectar inclusiones. El área de observación total es de más de 35000 mm<sup>2</sup>. Tras la preparación de las muestras, después del pulido, las muestras se observan primero bajo un microscopio óptico para marcar las localizaciones de todas las inclusiones mayores de 20 μm de diámetro, marcando este diámetro como diámetro mínimo a inspeccionar. Después, la morfología y composición detallada de cada inclusión se analiza por microscopio electrónico de barrido (SEM) usando análisis por rayos-X.

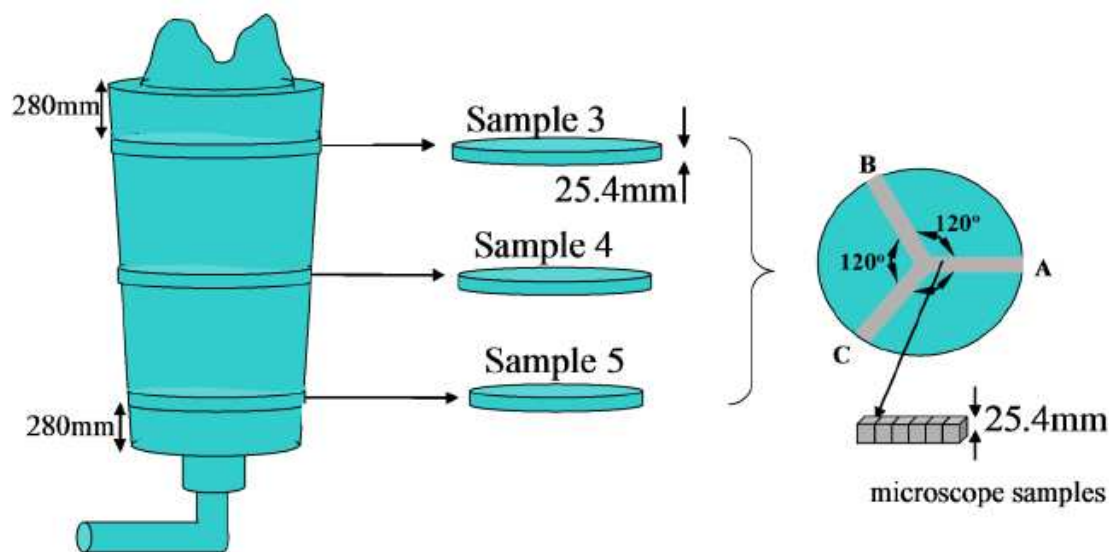


Figura 10. Localización esquemática de las muestras tomadas en lingotes redondos.

Del mismo grupo de lingotes se corta además uno en dos longitudes de 2.1 m cada uno. Estas dos piezas se forjan dentro de barras de un diámetro de 190.5 mm. Una vez forjadas las muestras, se preparan eliminando de la pieza 6 mm de la superficie por mecanizado, detectándose las inclusiones en las barras resultantes de diámetro 184.5 mm usando técnicas de ultra sonidos (USS).

#### 6.4.2. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE INCLUSIONES POR ULTRASONIDOS

Las barras forjadas se examinan utilizando técnicas de ultrasonidos, para la detección de grandes inclusiones o defectos en las muestras de acero, las cuales se sumergen en agua dentro de un tanque durante la inspección. En el estudio realizado, por este método sólo se detectan dos inclusiones, una de éstas inclusiones no metálicas fue descubierta en la parte superior de la barra inferior del lingote, con unas dimensiones de más de 20 mm de longitud, incluso después de ser forjada. La inclusión contiene O, Na, Mg, Al, Si, K, Mn, S y Ca, indicando esto que el origen está en el molde.

El hecho de que las inclusiones que se observan por ultrasonidos fueran pocas, indica que este método puede revelar sólo grandes inclusiones, mayores de 1 mm de longitud aproximadamente. Este método es crucial para detectar inclusiones grandes y poco frecuentes. Sin embargo, para realizar una buena limpieza del acero también se requiere observación al microscopio y detección por SEM.



### **6.4.3. MÉTODOS DE DETECCIÓN EN EL LINGOTE CON MICROSCOPIO Y SEM**

Las inclusiones típicas detectadas por observaciones al microscopio óptico y la correspondiente imagen por SEM de las mismas inclusiones/agujeros se comparan en la tabla 4. El microscopio electrónico de barrido revela la verdadera morfología de los defectos de manera más clara que las observaciones al microscopio. Los defectos S1 y S5 se parecen a las inclusiones bajo la observación por microscopio. Sin embargo, las imágenes por SEM claramente revelan que S1 es un racimo de inclusiones con un agujero, y S5 es una porosidad interdentrítica. Las imágenes por SEM también muestran que S2 es un racimo de inclusiones al contrario que la inclusión con forma cuadrada como parece bajo el microscopio; S4 es un agujero con forma irregular formado tras el pulido de la superficie, más que una inclusión; y S6 es un círculo con forma de burbuja más que una inclusión. Por tanto se observa que la proximidad en los resultados de la detección de inclusiones por detección por ultrasonidos o por observación al microscopio es pequeña, pero la combinación de las dos técnicas consigue buenos resultados.


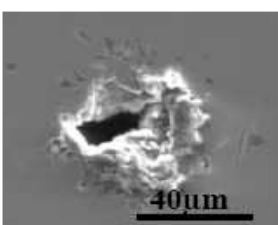

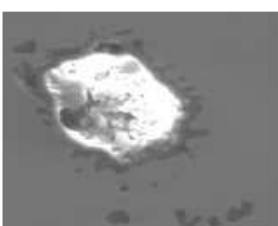

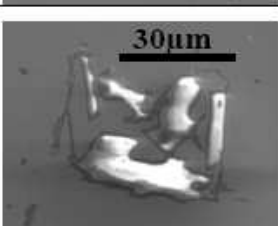

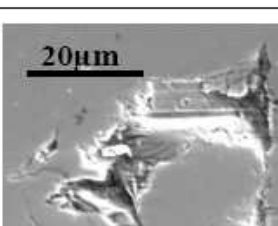

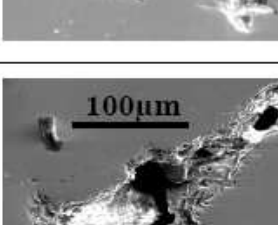

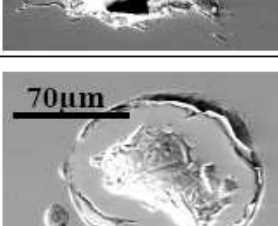
	Two dimensional microscope observation	Three-dimensional SEM detection	
S1			Partially-dislodged pure alumina cluster
S2			Pure alumina cluster
S3			Pure alumina lumps
S4			Irregular-shaped hole remaining after inclusion was polished away
S5			Hole between dendrite arms caused by micro-porosity
S6			Bubble-shaped cavity with sulfide inclusions in its wake.

Tabla 4.Comparación de las imágenes en 2D del microscopio y en 3D por SEM de inclusiones típicas

#### 6.4.4. CANTIDAD DE INCLUSIONES Y DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS

En el análisis realizado sobre las muestras se detectan 78 inclusiones no metálicas mayores de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro, que se representan en las figuras 11 y 12. Del total de muestras observadas, la mayoría de estas inclusiones (47) fueron observadas en la sección próxima al fondo del lingote, 29 en las muestras tomadas de la parte central del lingote, y no se encontraron inclusiones en la parte superior del lingote. Se observa que la cantidad de inclusiones presentes disminuye según aumenta la altura del lingote. En el fondo del lingote, las inclusiones se concentran mayoritariamente en dos regiones, son máximas a 40 y 120 mm del eje del lingote. Para la altura media del lingote, las inclusiones se distribuyen de manera más aleatoria, aunque puede existir una leve concentración en la superficie del lingote.

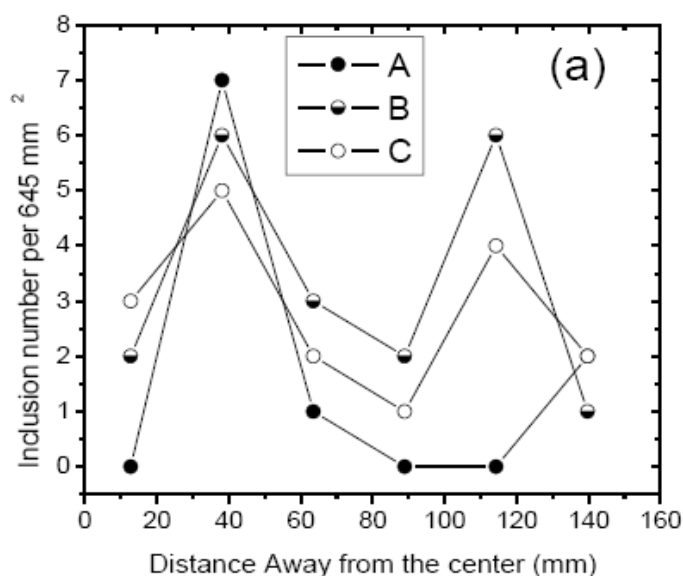


Figura 11. Inclusiones (>20  $\mu\text{m}$ ) observadas a 280 mm del fondo del lingote



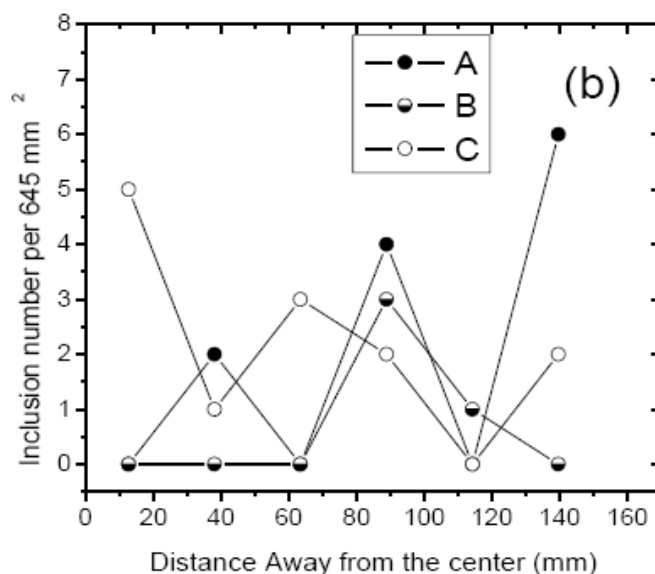


Figura 12. Inclusiones ( $>20\ \mu\text{m}$ ) observadas en la mitad de la altura del lingote.

Para cada altura, las inclusiones están distribuidas de manera aleatoria alrededor del perímetro del lingote, pero puede existir una leve tendencia de más inclusiones en la zona del fondo del lingote más cercana a la trompeta, que coincide con las direcciones B y C de la figura 10.

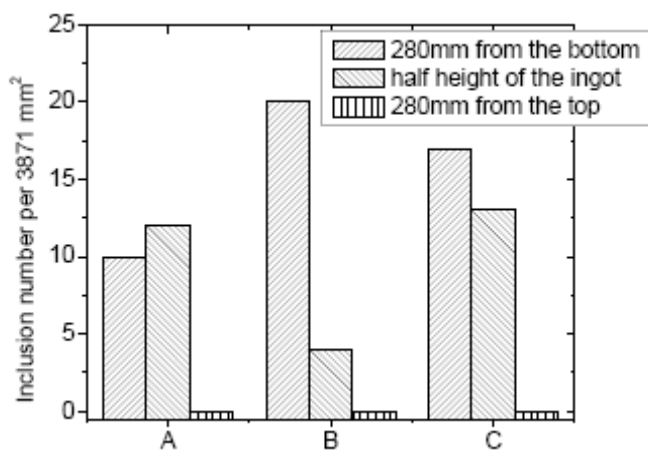


Figura 13. Inclusiones ( $>20\mu\text{m}$ ) para muestras de lingotes (A: sigue la misma dirección del conducto de salida de la trompeta, B y C: hacia la trompeta)

La distribución de tamaños de las inclusiones obtenidas a partir de las observaciones en dos dimensiones (2D) con el microscopio se muestran en la figura 14, y se calcula la distribución de tamaño en tres dimensiones (3D), figura 15, usando la ecuación siguiente:

$$n_{eD} = \frac{n_{2D}}{d_p} * 10^{12}$$

- $n_{2D}$ : nº de inclusiones por  $\text{mm}^2$  de área en la superficie de acero
- $d_p$  : diámetro de la inclusión en  $\mu\text{m}$  bajo observación con microscopio en 2D
- $n_{3D}$ : nº de inclusiones por  $\text{m}^3$  de volumen de acero.

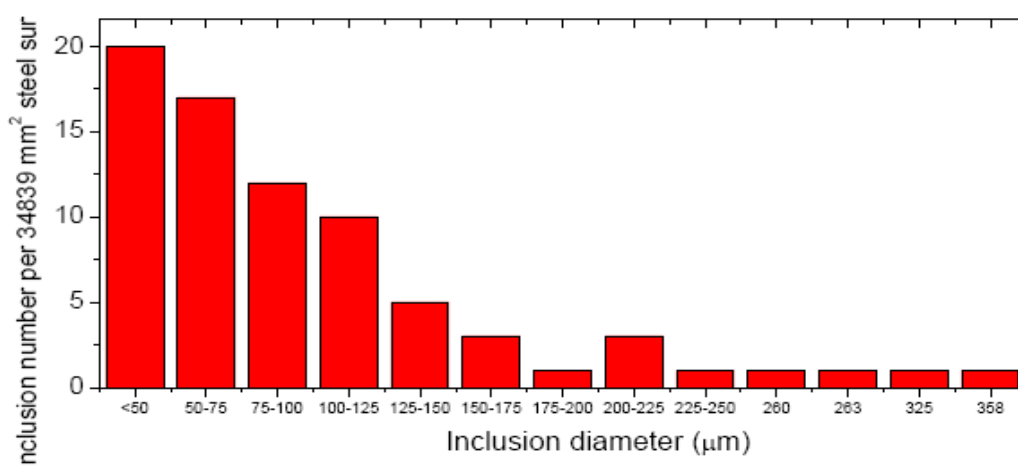


Figura 14. Distribución de tamaños de las inclusiones en 2D.

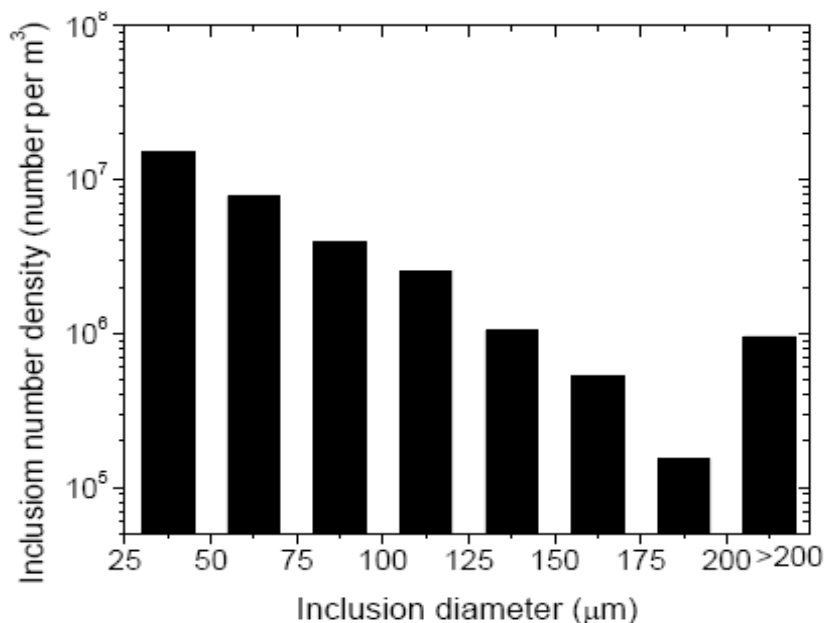


Figura 15. Distribución del tamaño de las inclusiones en 3D.

Se asume que el diámetro de las inclusiones bajo observación en 2D con microscopio es el mismo que las inclusiones reales en 3D. Sin embargo el diámetro de las inclusiones observado en 2D es normalmente menor que su diámetro real en 3D debido a que la sección de la superficie observada en 2D tras la preparación de las



## **CAPÍTULO 6**

### **INCLUSIONES EXISTENTES EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ACERO**

muestras, raramente cruza el diámetro de la esfera. Debido a este hecho la limpieza de acero observada está por debajo de la fracción de inclusiones existentes en el acero calculada según el estudio presente.

Hay aproximadamente un total de  $3 \cdot 10^7$  inclusiones mayores de  $20 \mu\text{m}$  por  $\text{m}^3$  de acero, incluyendo unas  $10^6$  inclusiones mayores de  $200 \mu\text{m}$  por  $\text{m}^3$  de acero. El número total de inclusiones en el lingote es mucho mayor que este, ya que hay que considerar que la mayoría de las inclusiones que son menores de  $20 \mu\text{m}$  y las inclusiones de azufre no se cuentan. En las figuras 14 y 15 destaca el aumento del número de inclusiones con la disminución en el diámetro de éstas, excepto para unas pocas inclusiones con tamaños grandes, las cuales tienen tamaños aleatorios, probablemente debido a un tamaño de muestra pequeño.

#### **6.4.5. TIPOS DE INCLUSIONES. COMPOSICIÓN**

##### **6.4.5.1. RACIMOS DE ALÚMINA PURA**

La figura 16 y la tabla 4 muestran racimos típicos de inclusiones de alúmina pura. De las 78 inclusiones no sulfúricas observadas en el lingote, la mayoría (46) son alúmina pura, la mayoría con un tamaño mayor de  $50 \mu\text{m}$ . Aproximadamente la mitad de estas inclusiones de alúmina (25) son racimos de alúmina, mientras los restantes son pedazos de alúmina con forma irregular. Los racimos pueden estar parcialmente rodeados por acero, como se muestra en S7 y S10 de la figura 16, o estar rodeados totalmente por el acero, S9. En S11 se observa que en el centro de la inclusión existe un hueco formándose durante el pulido de la muestra.

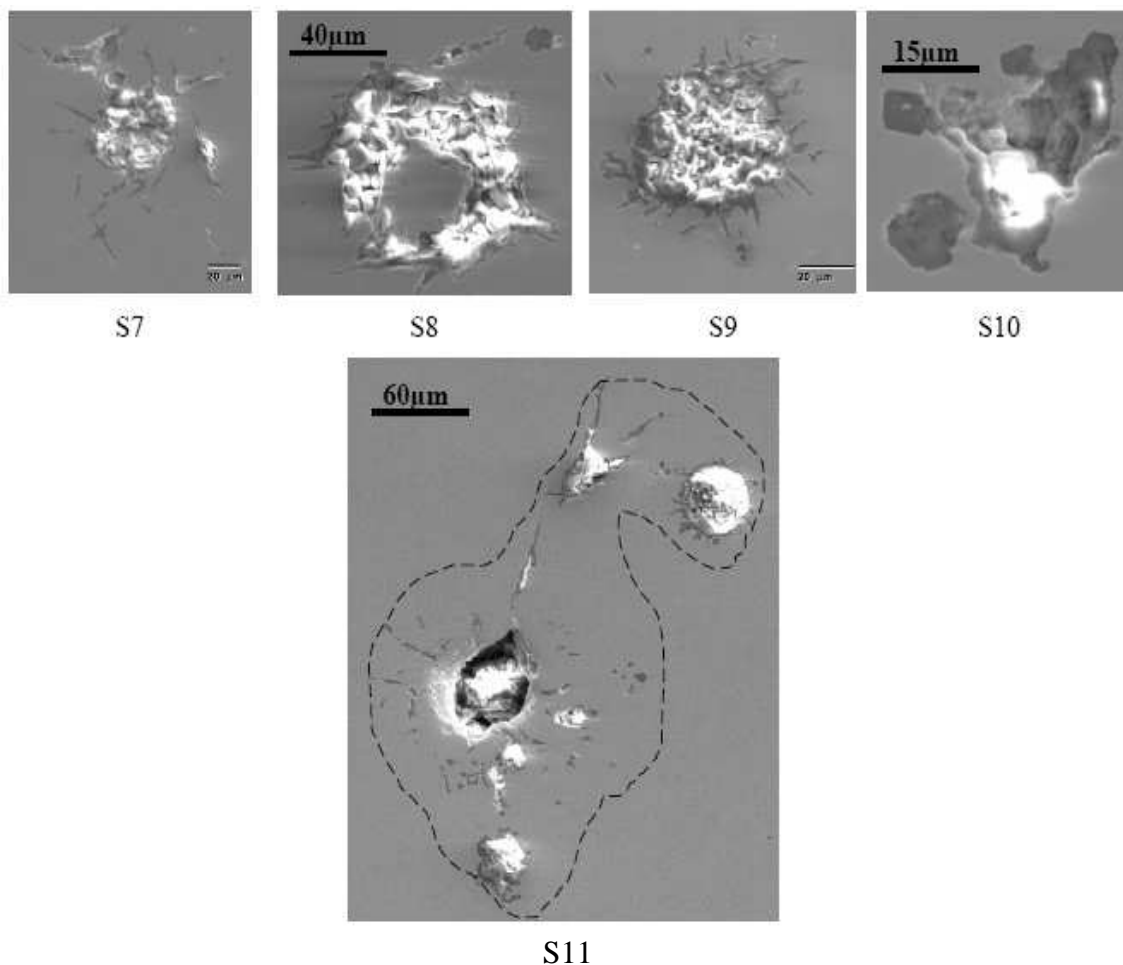


Figura 16. Morfología de racimos de alúmina pura.

Las posibles fuentes de racimos de alúmina incluyen productos de desoxidación, reoxidación por la absorción de aire, maduración de alúmina dendrítica y sinterización por colisión de muchas inclusiones pequeñas de alúmina. El análisis de tales racimos para determinar su composición, muestra que están compuestos por alúmina pura, no pudiendo surgir por tanto de ladrillos refractarios o escoria. La agrupación de productos desoxidantes es una posible fuente, pero el refino debería haber prevenido esas cantidades tan grandes. La fuente principal es probablemente, al menos de los racimos grandes, la reoxidación por aire. La absorción de aire que conlleva la reoxidación, tiene lugar entre la cuchara y la trompeta durante la transferencia del acero de una a otra. Durante la transferencia del acero de la cuchara a la trompeta, no se realiza ninguna protección, de esta manera la absorción de aire en este punto puede ser muy severa.

#### 6.4.5.2. INCLUSIONES DE ALÚMINA PURA

En las muestras analizadas de los lingotes se observan 21 inclusiones de alúmina pura, como se muestra en la tabla 4 (S3) y en la figura 17. Algunas de estas inclusiones al preparar las muestras, pueden ser cortadas muy cerca de su centro o cerca del borde. Algunas inclusiones parecen ser un agregado de muchas inclusiones de alúmina con forma de aguja que tras su colisión, forma la inclusión final, como se muestra en S3, S12 y S13. Otras son simplemente pedazos de alúmina, como son S14, S15 y S16.

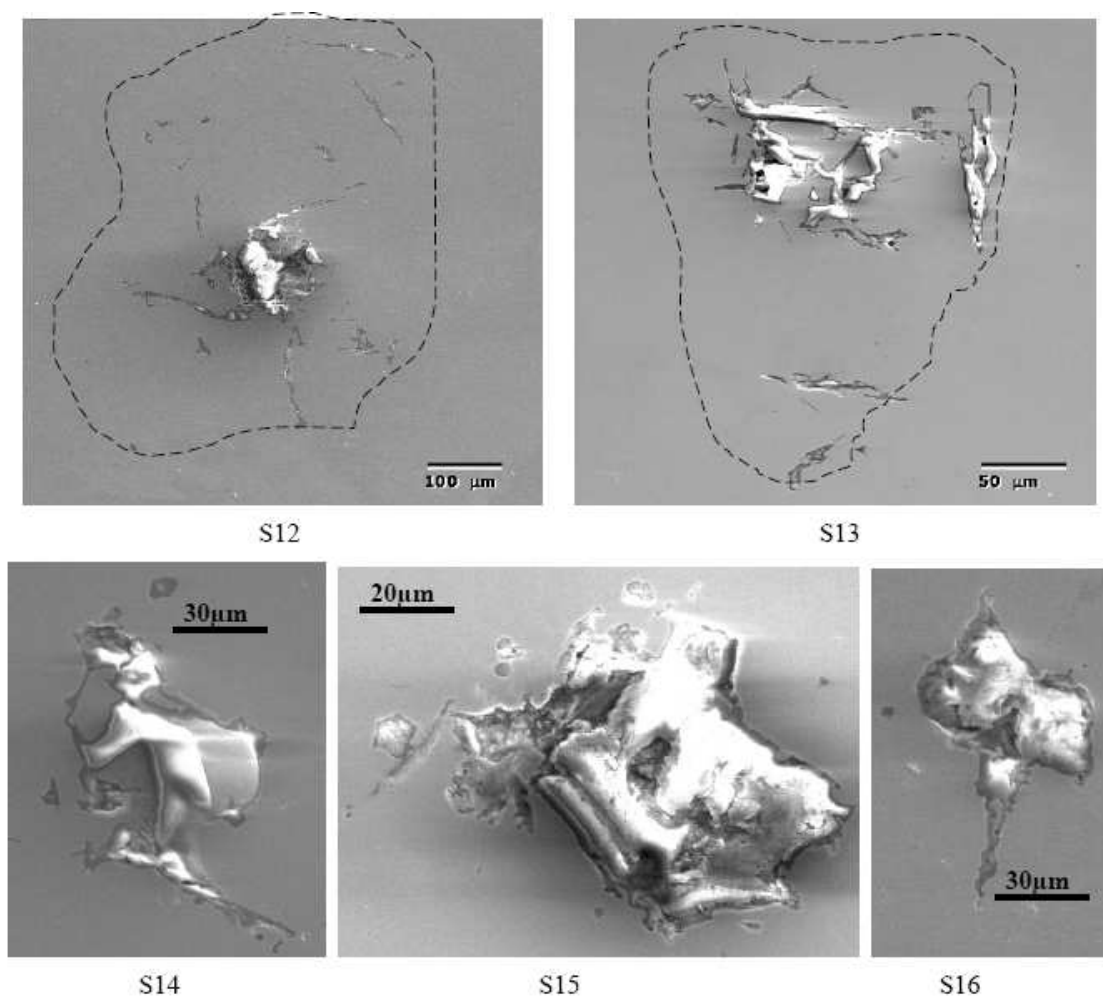


Figura 17. Morfología inclusiones de alúmina pura.

#### 6.4.5.3. RACIMOS DE ALÚMINA CON INCLUSIONES NOCIVAS

Se observan diversos racimos multicomponente que contienen alúmina y otras inclusiones nocivas, como se ve en la figura 18. El mecanismo de formación de estas inclusiones se produce en varios estados. Su composición complicada sugiere que las

partículas de alúmina combinadas con las partículas añadidas en el molde, rompan los forros refractarios y la escoria de la cuchara. La micrografía S17 muestra una cavidad irregular de unas 250  $\mu\text{m}$  con algunas inclusiones remanentes en su interior, lo cual significa que la mayoría de las inclusiones fueron pulidas fuera. La composición de la localización 1 es  $\text{Al}_2\text{O}_3$  69.94%,  $\text{MgO}$  15.84%,  $\text{FeO}$  4.79%,  $\text{K}_2\text{O}$  7.32%,  $\text{Na}_2\text{O}$  0.76%,  $\text{ZrO}_2$  1.37%, por tal composición la inclusión puede proceder de las partículas añadidas en el molde. La inclusión de la localización 2 es un racimo de alúmina pura, mayor de 50  $\mu\text{m}$ . Cuando las inclusiones nocivas grandes se mueven a través del acero líquido, pueden crecer por nucleación de otros compuestos procedentes del acero fundido y saturado, o simplemente por choque con otras inclusiones. Las inclusiones S18 y S19 son ejemplos de un racimo grande de alúmina capturando inclusiones nocivas desde el forro refractario ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  84.41%,  $\text{MgO}$  5.77%,  $\text{FeO}$  2.96%,  $\text{CaO}$  2.57%). La inclusión S19 consta de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  76.71%,  $\text{MgO}$  23.29%, y es un racimo compuesto.

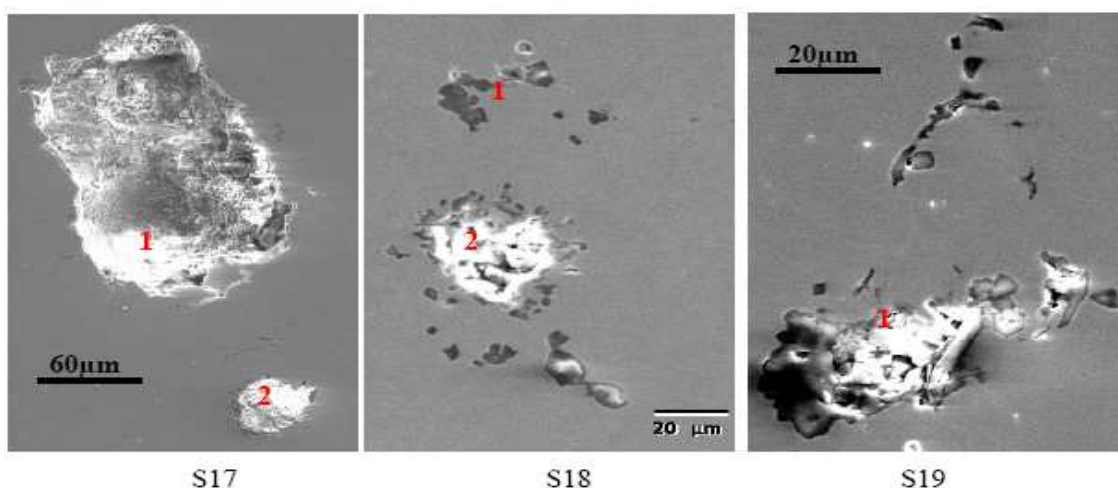
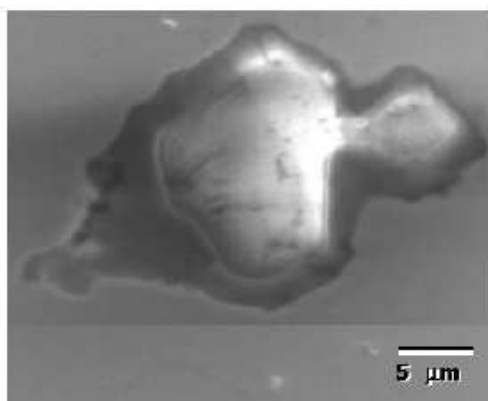


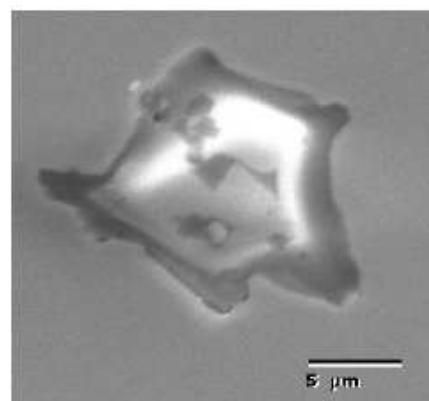
Figura 18. Racimos de alúmina con inclusiones nocivas

#### 6.4.5.4. INCLUSIONES DE $\text{Al}_2\text{O}_3$ Y $\text{MgO}$

Se localizan muchas inclusiones grandes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ , tal como se muestra en S18, S19 en la figura 34, y S20, S21 en la figura 19. Su composición es similar a la del sumidero de la cuchara, y su forma es irregular con un tamaño de 20-30  $\mu\text{m}$ . Esas inclusiones se forman por erosión directa del sumidero de la cuchara, o por racimos de alúmina que atacan primeramente a la superficie del sumidero de la cuchara como un obstáculo, salen hacia el acero líquido tras su reacción con el material del sumidero y quedan solidificadas.



S20 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  71.72,  $\text{MgO}$  23.56,  $\text{FeO}$  1.82,  $\text{MnO}$  2.90)

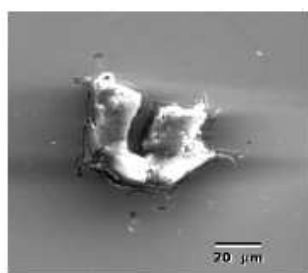


S21 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  89.26,  $\text{MgO}$  10.74)

Figura 19. Inclusiones de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$

#### 6.4.5.5. INCLUSIONES NOCIVAS PROCEDENTES DE LA BOQUILLA DE LA CUCHARA

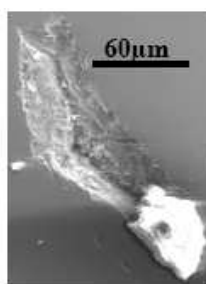
El número de inclusiones que contienen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  94-98%,  $\text{ZrO}_2$  2-6%, composición muy similar a la de la parte interior de la boquilla de la cuchara, son 7. La parte interior de la boquilla ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  94%,  $\text{ZrO}_2$  2.50%,  $\text{SiO}_2$  1%, y otros 2.5%) es el único forro refractario que contiene óxido de Zr. Durante el proceso de transferencia del acero de cuchara a trompeta, es cuando la boquilla de la cuchara se erosiona y se producen inclusiones dentro del acero líquido, probablemente debido a una velocidad muy alta del fluido, temperatura elevada y/o un largo tiempo. Esas inclusiones se muestran en la figura 20. Las inclusiones S24 y S25 han sido parcialmente arrancadas durante los procesos de pulido.



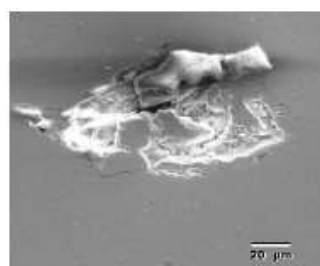
S22



S23



S24



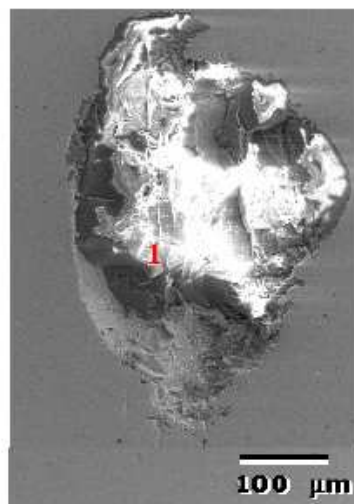
S25

Figura 20. Inclusiones nocivas precedentes de la boquilla de la cuchara



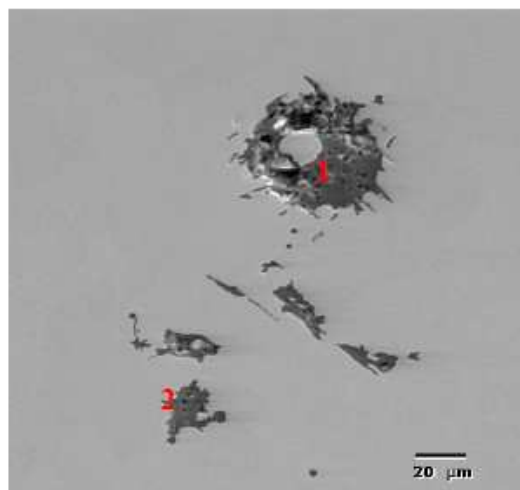
#### 6.4.5.6. INCLUSIONES PROCEDENTES DEL MOLDE

Se observan seis inclusiones con contenidos elevados de  $K_2O$  y  $Na_2O$ . Estas inclusiones proceden del molde, o quizá de la rotura de los ladrillos de los conductos que unen molde y trompeta, (S27), como muestra la figura 21. Algunas de estas inclusiones son muy grandes, entre 150-600  $\mu m$ .



$Al_2O_3$  22.05%,  $SiO_2$  47.02%,  $MgO$  1.88%,  $CaO$  3.15%,  $FeO$  8.51%,  $MnO$  11.95%,  $K_2O$  1.52%,  $Na_2O$  5.07%

S26



1:  $Al_2O_3$  83.22,  $MgO$  4.36,  $K_2O$  10.26  $CaO$  2.16  
2:  $Al_2O_3$  81.05,  $MgO$  3.62,  $K_2O$  10.27,  $CaO$  1.04,  $FeO$  4.03

S27

Figura 21. Inclusiones procedentes del molde y de los ladrillos del conducto.

#### 6.4.5.7. INCLUSIONES CON BASE DE SÍLICE

Se observan dos inclusiones con base de sílice esféricas mayores de 20  $\mu m$ . Un ejemplo se muestra en la figura 22, con una composición de  $Al_2O_3$  61.23%,  $SiO_2$  2.83%,  $CaOI$  35.94%. Estas inclusiones se originan desde la escoria de la cuchara, por la adición de  $CaSi$ . No proceden del molde ya que no contienen  $K_2O$  y  $Na_2O$ .

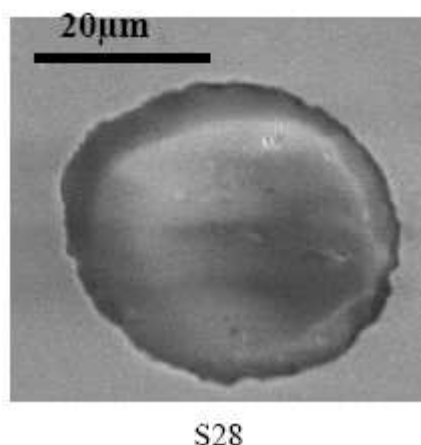
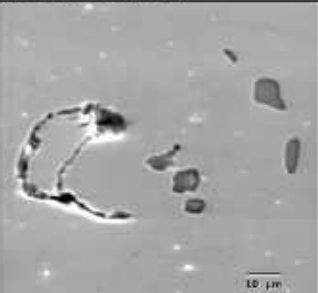
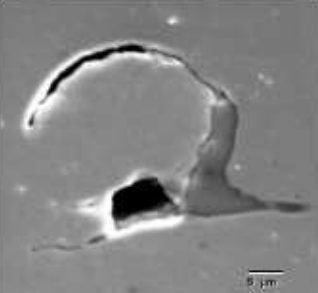
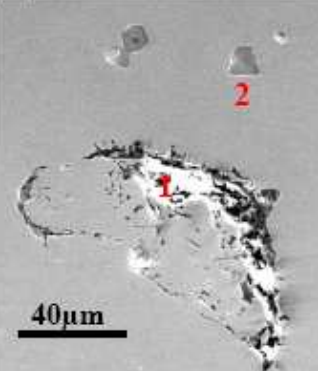
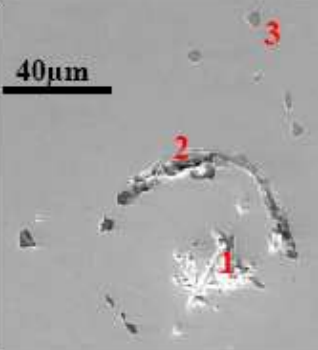


Figura 22. Inclusión con base de sílice.

#### **6.4.5.8. INCLUSIONES CON FORMA DE BURBUJA**

Diferentes defectos con forma de burbuja aparecen en las muestras de acero, como se muestra en la tabla 4 (S6) y en la tabla 5. Esos defectos contienen un anillo de inclusiones alrededor del límite de la burbuja, burbuja de gases. Su composición varía ampliamente, pero siempre incluye inclusiones de sulfuros puros ( $\text{MnS}$ ) y normalmente también inclusiones compuestas por  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$ . Aunque las inclusiones individuales son pequeñas, el defecto entero es muy grande y peligroso, con un diámetro de 50-300  $\mu\text{m}$ . Esos defectos se forman siguiendo el mecanismo siguiente:

- Paso 1: La burbuja en movimiento colisiona con inclusiones, las cuales atacan la mayoría de su superficie;
- Paso 2: Las inclusiones forman una cáscara alrededor de la superficie de la burbuja;
- Paso 3: El gas de la burbuja escapa (argón o CO) o reacciona en el acero (burbujas de aire);
- Paso 4: La cáscara de inclusiones se rellena con el acero fundido;
- Paso 5: Precipitan sulfuros durante la solidificación.

	SEM detection		Composition (%)	Description / Source
S29			MnS	Sulfide (likely precipitated onto former bubble surface during solidification)
S30			MnS	Sulfide (likely precipitated onto former bubble surface during solidification)
S31		1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 90.76 FeO 9.24	Alumina aluster (from reoxidation) and sulfide inclusions around the surface of a bubble-like cap (air)
		2	MnS 100	
S32		1	SiO <sub>2</sub> 21.84 MnO 1.00 FeO 77.16	Mold flux, reoxidation Inclusions around the boundary of a bubble-cap  (Sulfide)
		2	MgO 15.52 SiO <sub>2</sub> 0.60 MnS 15.42 CaO 1.51 MnO 18.75 FeO 48.20	
		3	MnS 100	

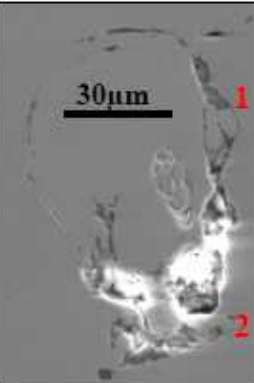
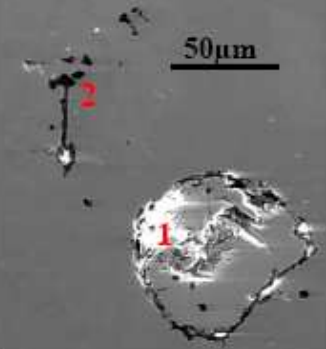
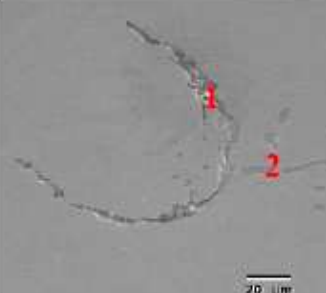
S33		1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 78.17 MgO 11.61 FeO 10.22	Inclusion cluster (alumina from reoxidation plus ladle lining) at the boundary of a former air bubble
		2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 76.23 MgO 15.61 FeO 8.16	
S34		1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 83.32 MgO 16.68	Inclusion cluster (alumina from reoxidation plus runner, trumpet or ladle bottom lining ) attached to the boundary of a former air bubble
		2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 83.88 MgO 5.97 CaO 7.29 FeO 2.85	
S35		1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 84.05 MgO 15.95	Compound inclusion (alumina from reoxidation and ladle lining) along boundary of a former air bubble
		2	MnS	

Tabla 5. Defectos de inclusiones formadas sobre burbujas

#### 6.4.5.9. CAVIDADES Y AGUJEROS

Otros tipos de defectos que no son inclusiones son los diferentes tipos de cavidades y agujeros que se encuentran en las muestras. Algunos de ellos simplemente aparecen durante el pulido por la dislocación de inclusiones, como se muestra en la tabla 4 (S1, S4), figura 16 (S11), figura 18 (S17), figura 20 (S24 y S25). Durante la solidificación se forman agujeros por el escape del gas de la burbuja esférica de N<sub>2</sub>, CO y gas argón, como se ve en S29 y S30 de la tabla 5. Durante los estados finales de la solidificación se forman agujeros con forma irregular comprendiendo cavidades interdendríticas llamadas “microporosidad”.

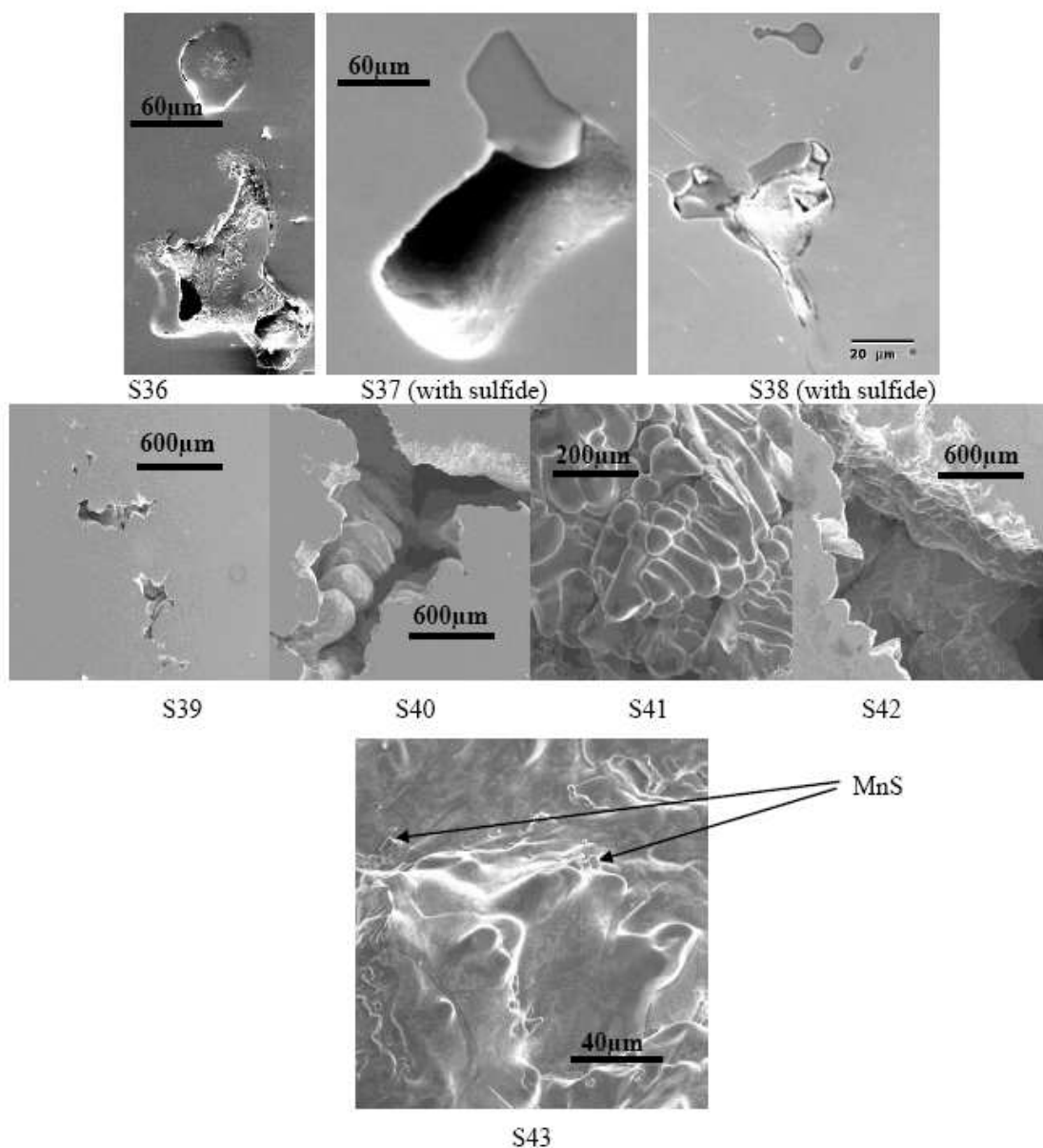


Figura 23. Cavidades y agujeros encontrados en muestras de acero.

Las cavidades con forma de microporosidad debido a problemas en la alimentación de líquido dentro de los espacios interdendríticos, se observan más a menudo próximos al centro del lingote donde el líquido está más pastoso y la alimentación del líquido es más difícil. A menudo están asociadas con sulfuros, los cuales se concentran en la misma región debido a la microsegregación de S y Mn. La figura 23 muestra diversos ejemplos de interés. Los sulfuros están presentes a lo largo de los límites dendríticos (agujeros) en S37 y S38. El racimo vacante en S39 ilustra una leve microporosidad. Microporosidad cercana a la línea central del lingote, se muestra en S40 y S42, mostrando la naturaleza irregular del borde del interior de los agujeros. Un primer plano de la superficie dendrítica en S43 muestra inclusiones de MnS en los bordes dendríticos.

#### 6.4.5.10. INCLUSIONES DE SULFUROS

El último tipo de defectos que se encuentra tras el estudio de las muestras son las inclusiones de sulfuros. En S6 de la tabla 4, S29, 30, 31, 32, 35 de la tabla 5, S37, 38 y 43 en la figura 23 y en la figura 24, se muestran ejemplos de sulfuros. Estas inclusiones a menudo aparecen en racimos con un gran tamaño ( $>100\ \mu\text{m}$ ) y son generalmente más grandes que las inclusiones individuales. Los sulfuros tienden a concentrarse alrededor de los límites de burbujas antiguas y próximos a cavidades interdendríticos.

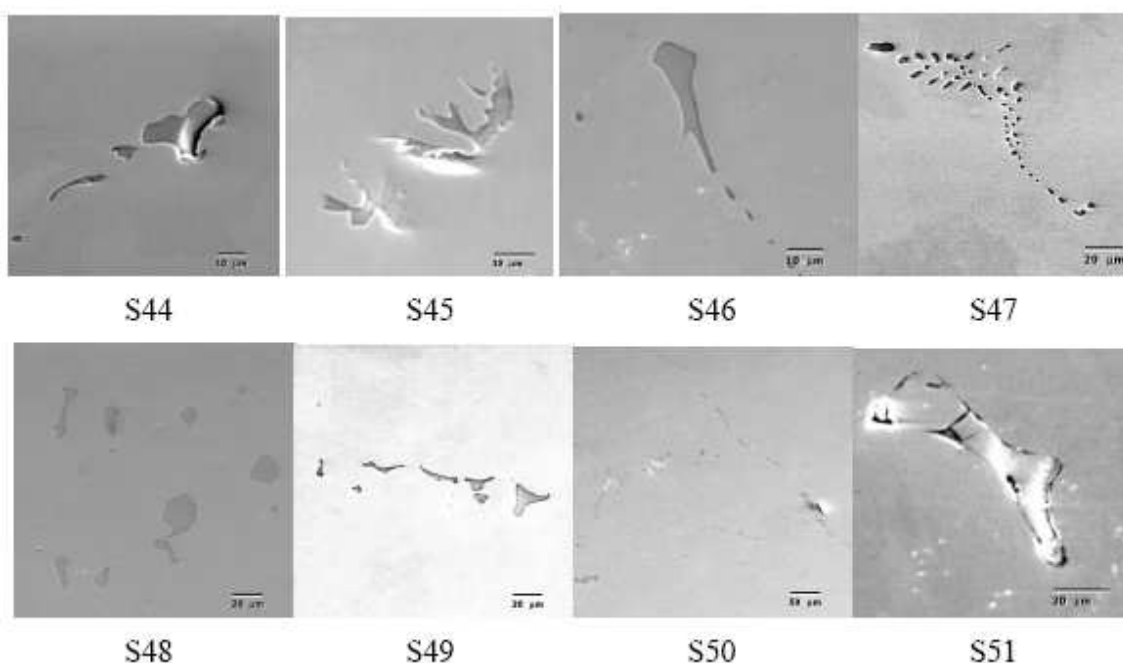


Figura 24. Inclusiones de sulfuros

#### 6.4.5.11. RESUMEN DE FUENTES DE INCLUSIONES EN LINGOTES

La composición de las 78 inclusiones mayores de  $20\ \mu\text{m}$  observadas, sin incluir las que contienen sulfuros, se representan en el diagrama de tres fases en la figura 25. En total, el 59% de las inclusiones de alúmina. Esas inclusiones aparecen principalmente por la reoxidación con aire, siendo los lugares de absorción de aire la conexión entre cuchara y trompeta durante la transferencia del acero, y la superficie superior del acero fundido en el lingote durante su llenado. De las inclusiones remanentes con composición compleja, el 22% provienen del material refractario del sumidero de la cuchara, el 9% de la parte interior de la boquilla de dicha cuchara, 8% del molde, y el 2% de inclusiones de escoria, como se muestra en la tabla 6. No se encuentran inclusiones de los ladrillos del conducto de unión entre trompeta y molde o de los de la trompeta. Las inclusiones del molde son más importantes que las indicadas aquí, debido



a dos grandes inclusiones observadas por detección por ultrasonidos y no incluidas. Además se observan gran número de inclusiones de sulfuros e inclusiones muy pequeñas ( $<20\text{ }\mu\text{m}$ ) de todos los tipos que no están incluidas

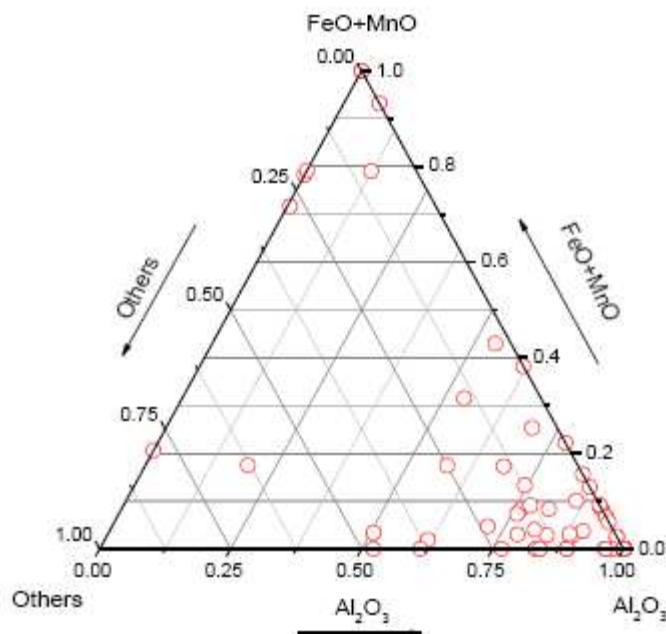


Figura 25. Composición de inclusiones observadas en las muestras

	Number	Percentage (%)
Alumina (air reoxidation)	46	59%
ladle well block	17	22%
Ladle inner nozzle	7	9%
Mold flux	6	8%
slag inclusions (not mold flux)	2	2%
trumpet and runner bricks	0	0%

Tabla 6. Fuentes de inclusiones mayores de  $20\text{ }\mu\text{m}$  en lingotes.

## 6.5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

- Sobre lingotes de acero al carbono llenados desde el fondo se realiza una completa investigación de inclusiones, usando técnicas de detección por ultrasonidos, observación con microscopio óptico, y análisis con SEM. La composición, distribución de tamaños, localizaciones, y fuentes de las





## **CAPÍTULO 6**

### **INCLUSIONES EXISTENTES EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ACERO**

inclusiones se analizan para las inclusiones mayores de 20  $\mu\text{m}$  de todas las observadas.

- Las inclusiones mayores exceden los 20 mm y se originan desde el molde del lingote.
- La extrapolación desde los 35000 mm<sup>2</sup> de las muestras observadas, muestra una distribución de tamaño creciente en número con el descenso del tamaño de las inclusiones.
- Para toda la altura, las inclusiones se distribuyen de manera aleatoria alrededor del perímetro del lingote, pero hay una ligera tendencia de mayor número de inclusiones en el lingote en la zona del lingote próxima a la trompeta y en el fondo del lingote.
- La fuente de inclusiones mayor es la reoxidación, como evidencian el 59% de las inclusiones compuestas por racimos y pedazos de alúmina pura.
- Los materiales refractarios erosionados del sumidero de la cuchara y de los ladrillos del interior de la boquilla acumulan el 31% de las inclusiones en el lingote.
- La evaluación de inclusiones en el lingote requiere una combinación de métodos de detección, incluyendo detección por ultrasonidos para encontrar las inclusiones mayores, observación con microscopio óptico para encontrar las inclusiones >20  $\mu\text{m}$ , y una evaluación con SEM para confirmar la composición y origen de las inclusiones previamente detectadas.



## **CAPÍTULO 6**

### **INCLUSIONES EXISTENTES EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DEL ACERO**



## **CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES**

En este proyecto se ha realizado un estudio de las inclusiones presentes en aceros utilizados en ruedas ferroviarias y por tanto de las inclusiones existentes en las ruedas en servicio. La realización del proyecto ha estado motivada por la aparición en la actualidad de fisuras en ruedas con bajo kilometraje de vehículos ferroviarios y por el conocimiento de que las inclusiones actúan como iniciadores de fisuras al tener un factor intensidad de tensiones muy bajo.

Para comprender mejor el contenido del proyecto, en primer lugar se realiza una introducción teórica de la mecánica de la fractura y del fenómeno de fatiga. Se presentan conceptos como defectos del material y concentración de tensiones para, a continuación, exponer los distintos mecanismos y modos de fractura. Se definen conceptos como la nucleación y propagación de fisuras, y las curvas S-N y teorías correctoras de Goodman, Soderberg y Gerber mediante las cuales se estudian estos fenómenos.



En cualquier estudio que implica ruedas ferroviarias, se debe estudiar el contacto rueda-carril, con el planteamiento de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios. Se analiza cual es la geometría de contacto rueda-carril y los fenómenos característicos que tienen lugar en ese contacto, como es el pseudo-deslizamiento que influye en gran medida en el comportamiento y guiado del tren.

A continuación se desarrollan tres modelos de predicción de RCF, mecanismos de fatiga superficial, subsuperficial y de defectos profundos. El fallo tiene lugar a bajos ciclos de carga en la fatiga superficial, en la banda de rodadura. No es un fallo grave ya que es fácil de detectar y se puede proceder al reperfilado de la rueda para eliminarlo. El segundo tipo de fatiga es el subsuperficial, situado bajo una profundidad de entre los 3 y los 10 mm bajo la banda de rodadura y debido a defectos del material pudiendo provocar desprendimientos del material de la rueda. El último mecanismo de fatiga es el de defectos profundos, situado bajo una profundidad de 10 mm y se produce por la combinación de cargas verticales elevadas y la existencia de inclusiones grandes del material.

Lo siguiente es describir de forma general los bogies y en detalle los ejes y las ruedas. Como el proyecto está centrado en inclusiones en ruedas ferroviarias se ha considerado muy importante conocer cual es el método de fabricación de ruedas, desarrollándolo en este apartado.

Para poder realizar un buen plan de mantenimiento en ruedas es necesario conocer los principales tipos de daño que existen mayoritariamente en las ruedas en servicio. Por ello se detallan los distintos tipos de daño además de un estudio realizado mediante la utilización de un programa de elementos finitos para entre ambos servir de guía de un plan de mantenimiento. En este estudio se analiza el efecto de distintos parámetros, como diámetro de la rueda, cargas verticales, dureza del material, resistencia a fatiga y ductibilidad del material, en el daño por fatiga para ruedas ferroviarias. La tasa de acumulación de daño disminuye según aumentan el diámetro de la rueda y la resistencia a fatiga del material y aumenta según aumentan tanto la carga por rueda como la dureza del material. De esta forma conociendo las propiedades de los materiales de las ruedas ferroviarias y el número de ciclos realizados desde la última revisión se idea un plan de mantenimiento acorde a la tasa de daño acumulada que tenga la rueda.

Se incluye además un apartado de tenacidad de fractura aplicada a ruedas ferroviarias donde se desarrollan unos parámetros que pueden considerarse indicativos de calidad de ruedas, como son  $K_Q$  y  $K_{EE}$ . Por tanto, un buen camino para determinar la calidad de un material en producción es la introducción de un índice de calidad,  $YS_x$



$K_Q$ , que une tenacidad junto con el límite elástico del material. De las gráficas expuestas se concluye que los fabricantes de acero de ruedas ferroviarias son capaces de fabricar ruedas con elevada resistencia y elevada tenacidad, con valores incluso mayores a los marcados por la norma que son 520 MPa y 80  $\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$ . Los valores de tenacidad de fractura depende de la microestructura del acero y en gran medida aumenta su valor con la disminución de las inclusiones.

En el capítulo 6 se desarrolla un completo estudio sobre inclusiones en aceros, determinando la composición, distribución de tamaños, localizaciones y fuentes de las inclusiones que sean mayores de 20  $\mu\text{m}$ . El número de inclusiones crece con la disminución de su tamaño, siendo la alúmina y racimos de alúmina el tipo de inclusión mayoritaria en aceros.

A pesar de los esfuerzos llevados a cabo para la eliminación de las inclusiones en los procesos de elaboración de los aceros utilizados en ruedas ferroviarias, es imposible la fabricación de un acero libre de defectos. Las inclusiones presentes en los lingotes de acero cortados en pedazos para su transformación mediante forjado en ruedas ferroviarias, pueden cambiar su forma tras el forjado, pero siguen actuando como concentradoras de tensiones y como zonas de peligro para la nucleación y propagación de fisuras. Por tanto es difícil tener una rueda libre de peligro de existencia de fisuras, siendo necesaria una inspección periódica de dichas ruedas para la detección de fisuras.

El ciclo de vida de las ruedas ferroviarias puede mejorar con:

- El uso de aceros con propiedades mecánicas superiores a las actuales, mayor límite elástico y mayor tenacidad de fractura, teniendo en cuenta siempre la resistencia al desgaste.
- El cambio en los procesos de producción de acero, con el mayor control de la chatarra fundida para la obtención de aceros. Esta chatarra contiene inclusiones que al final pertenecerán al acero de nueva fabricación y por tanto a las ruedas fabricadas.
- La disminución de cargas transmitidas a las ruedas con el uso de sistemas de amortiguación adecuados.
- La implementación en trenes de dispositivos electrónicos que midan en las cajas de grasa de cada rueda valores atípicos de esfuerzos, temperaturas, dando aviso online al departamento de mantenimiento.



## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES**



## **CAPÍTULO 8**

### **TRABAJOS FUTUROS**

Los trabajos futuros que se pueden seguir a partir del desarrollo del presente proyecto, pueden ser las siguientes:

- Análisis de la influencia de las suspensiones tanto primaria como secundaria de vehículos ferroviarios sobre los esfuerzos soportados por las ruedas y sobre la fatiga en contacto rodante, RCF.
- Realización de un estudio sobre el efecto de la vía sobre las fuerzas generadas en el área de contacto rueda-carril. Irregularidades de la vía, rugosidad de la superficie, perfil de los carriles.
- Estudios futuros considerando los efectos de la interacción de varios parámetros como los vistos en el capítulo 5, diámetro de la rueda, cargas verticales, dureza del material... introduciendo otras variables como demás esfuerzos a los que está sometida la rueda, defectos existentes.
- Análisis de los materiales utilizados como chatarra en el proceso de elaboración del acero, determinando las inclusiones existentes en ellos para conocer su permanencia y eliminación.
- Estudio de los procesos de producción del acero por proceder muchas de las inclusiones de forros refractarios.





## **CAPÍTULO 8**

### **TRABAJOS FUTUROS**



# CAPÍTULO 9

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

### 9.1. REFERENCIAS

- [1] [Hertz, 1895] H. Hertz. *Gesamelte Werke*. Vol. 1. pp 155. Leipzig. 1895.
- [2] [Carter, 1916] F.W. Carter. *The electric locomotive*. Proc. Inst. Civ. Engs. 221. pp 221-252. 1916.
- [3] [Carter, 1926] F.W. Carter. *On the action of a locomotive driving wheel*. Proc. Royal Soc. Ser. A. Vol. 113. pp.151-157. 1926.
- [4] [Johnson, 1958] K.L. Johnson. *The effect of tangential contact force upon the rolling motion of an elastic sphere upon a plane*. J. Appl. Mech. Vol. 25. pp 339-346. 1958.
- [5] [Johnson, 1958] K.L. Johnson. *The effect of spin upon the rolling motion of an elastic sphere upon a plane*. J. Appl. Mech. Vol. 25. pp 332-328. 1958.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [6] [Haines and Ollerton, 1963] D.J. Haines and E. Ollerton. *Contact stress distribution on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces*. Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 177. pp 95-144. 1963.
- [7] [Johnson and Vermeulen, 1964] K.L. Johnson and P.J. Vermeulen. *Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces*. J. Appl. Mech. Sci. Vol. 31. pp 338-340. 1964.
- [8] [Kalker, 1964] J.J. Kalker. *The transmission of force and couple between two elastically similar rolling spheres*. Proc. Kon. Ned. Akad. Wet. Amsterdam. pp 135-177. 1964.
- [9] [Kalker, 1967] J.J. Kalker. *On the rolling contact for two elastic bodies in the presence of dry friction*. PhD dissertation. Delf University of Technology, Delf. Netherlands. 1967.
- [10] [Kalker, 1979] J.J. Kalker. *Survey of Wheel-rail rolling contact theory*. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 8. pp 317-358. 1979.
- [11] [Kalker, 1980] J.J. Kalker. *Review of Wheel-rail rolling contact theories, the general problem of rolling contact*. Applied Mechanics Division. Vol. 40. pp 77-93. 1980.
- [12] [Kalker, 1973] J. J. Kalker. *Simplified theory of rolling contact*. Delf Progress Report 1. pp 1-10. 1973.
- [13] [Kalker, 1982] J.J. Kalker. *A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact*. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 11. pp 1-13. 1983.
- [14] H. Hertz. *Gesamelte Werke*. Vol. 1. pp 155. Leipzig. 1895.
- [15] J.J. Kalker. *On the rolling contact for two elastic bodies in the presence of dry friction*. PhD dissertation. Delf University of Technology, Delf. Netherlands. 1967.
- [16] V.K. Garg and R.V. Dukkipati. *Dynamics of railway vehicle systems*. Academic Press, Inc. 1984.
- [17] J.J. Kalker. *Survey of Wheel-rail rolling contact theory*. *Vehicle System Dynamics*. Vol. 8. pp 317-358. 1979.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [18] J.J. Kalker. Review of Wheel-rail rolling contact theories, the general problem of rolling contact. Applied Mechanics Division. Vol. 40. pp 77-93. 1980.
- [19] J.J. Kalker. *A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact*. Vehicle System Dynamics. Vol. 11. pp 1-13. 1983.
- [20] [Lundén, 1992] R. Lundén. *Cracks in railway wheels under rolling contact load*. Proceeding of the 10 International Wheelset Congress. Sydney, Australia. pp 163-167. 1992.
- [21] [Ekberg, 1997] A. Ekberg. *Rolling contact fatigue of railway wheels, a parametric study*. Wear 211, pp 280-288. 1997.
- [22] [Ekberg, 1999] A. Ekberg and J. Marais. *Effects of imperfections on fatigue initiation in railway wheels*. ImechE. J. Rail. pp 45-54. 1999.
- [23] [Ekberg, 2001] A. Ekberg and P. Sotkovszki. *Anisotropy and fatigue of railway wheels*. Int. J. Fatigue 23. pp 29-43. 2001.
- [24] [Kabo] E. Kabo and A. Ekberg. *Fatigue initiation in railway wheels on the influence of defects*. Proceedings of the 5 International Conference on Contact Mechanics and Wear of Wheel/Rail System. pp 25-28. Tokyo, Japan. 2000.
- [25] [Kabo] E. Kabo. *Material defects in rolling contact fatigue, influence of overloads and defect clusters*. Int. J. Fatigue 24. pp 887-894. 2002.
- [26] [Ponter, Hearly and Johnson, 1985] R. S. Ponter, A. D. Hearly and K.L. Johnson. *Application of the kinematical shakedown theorem to rolling and sliding point contacts*. J. Mech. Phy. Solids 41. pp 487-505. 1985.
- [27] [Johnson, 1989] K. L. Johnson. *The strenght of surfaces in rolling contact*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. ImechE 203. pp 151-163. 1989.
- [28] [Ekberg, 1997] A. Ekberg. *Rolling contact fatigue of railway wheels, a parametric study*. Wear 211, pp 280-288. 1997.
- [29] [Ekberg, 2000] A. Ekberg. *Rolling contact fatigue of railway wheels toward tread life prediction through numerical modelling considerering material imperfections, probabilistic loading and operational data*. Chalmers University of Technology, Department of Solid Mechanics. Goteborg. Sweden. 2000.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [30] [Ekberg, 1996] A. Ekberg. *Rolling contact fatigue of railway wheels, Computer modelling and in-field data*. Proceedings of the 2 Miniconference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System. pp 154-163. Budapest. 1996.
- [31] [Damg Van] K. Dang Van, G. Cailletaud, J. F. Flavenot, A. Le Douaron and H. P. Lieurade. *Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading*. In. Biaxial and Multiaxial Fatigue. Mechanical Engineering Publications. pp 459-478. London. UK 1989.
- [32] AAR (Association of American Railroads). Manual of standards and recommended practices: section G-wheels and axles. Issue of 1998.
- [33] Guo YB, Barkey ME. Modeling of rolling contact fatigue for hard machined components with process-induced residual stress. *Int J Fatigue* 2004;26(6):605–13.
- [34] Ekberg A. Rolling contact fatigue of railway wheels—towards tread life prediction through numerical modelling considering material imperfections, probabilistic loading and operational data. PhD-Thesis. Chalmers University of Technology, Department of Solid Mechanics, Go'teborg, Sweden; 2000.
- [35] Isakov E. Mechanical properties of work materials. Cincinnati, OH: Hanser Gardner Publications; 2000.
- [36] Lovelace WS. Study of rim stresses resulting from static loads on different 36-inch railroad wheel designs. IEEE–ASME joint railroad conference, New York; 1971.
- [37] Devine, TJ, Alber RH. Wheel flange wear test results in heavy haul service. Second international heavy haul railway conference; 1982.
- [38] Papadopoulos IV, Davoli P, Gorla C, Filippini M, Bernasconi A. A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals. *Int J Fatigue* 1997;19(3):219–35.
- [39] Carpinteri A, Spagnoli A. Multiaxial high-cycle fatigue criterion for hard metals. *Int J Fatigue* 2001;23:135–45.
- [40] DIENER, M.: *Untersuchungen an Proben aus Monobloc-Rad A*, Sitzung des SVA B169, Romanshorn, Mai 1989.
- [41] DIENER, M., SPEIDEL, M.O.: *Bruch eines Eisenbahn-Vollrades*, Untersuchungsbericht, Inst. für Metallforschung, ETH Zürich, Oktober 1991.
- [42] ORE Frage B 169, Thermische Grenzen der Räder und Bremsklötze, Bericht Nr. 3: *Erforschung der Bruchschwelle*, Oktober 1991.



[43] DIENER, M., KUNNES, W., MÜLLER, R., *Bruchzähigkeit von Eisenbahnrädern und Methoden zu ihrer Bestimmung*, ORE DT 251 (Question B 169), Oct. 1991.

[44] Relazione Lucchini Sidermeccanica n° 441: *Applicazione della teoria della meccanica della frattura all'analisi della rottura di un cerchione di un locomotore RBE4*, 1975.

[45] RINALDI, R., STEVANIN, G., GHIDINI, A., CAROTI, F., IAFELICE, A.: *Quality in realizing wheelsets for High Speed in service*, 9<sup>th</sup> International Wheelset Congress Montreal, Canada, Sept. 1988.

[46] S. MAHADEVAN: *International Journal of Fatigue* 28, 2006

## 9.2. BIBLIOGRAFÍA

1. *Dynamics of railway vehicle systems*. Vijay K. Garg and Rao V. Dukkipati. Academic Press Publishers. 1984.

2. *Fundamentals of rail vehicle Dynamics*. A.H. Wickens. Loughborough University. Swets & Zeitlinger Publishers. 2003.

3. *Ferrocarriles. Ingeniería e infraestructura de los transportes*. Álvarez Mántaras, Daniel. Unversidad de Oviedo. 2003.

4. *An enginering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels*. A. Ekberg, E. Kabo and H. Andersson. Chalmers University of Technology. 2002.

5. *Life prediction of rolling contact fatiguecrack initiation*. Jonas W. Ringsberg. Department of solic mechanics, Chalmers University. 2001.

6. *Material defects in rolling contact fatigue of railway wheels*. The influence of defect size. E. Kabo and A. Ekberg. Chalmers University. 2004.

7. *Surface crack face displacements in railway wheels*. E. Lansler and E. Kabo. Department of aplyed mechanics. Chalmers University. 2004.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

8. *Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading-an overview*. A. Ekberg and E. Kabo. Department of applied mechanics. Chalmers University. 2004.
9. *Rolling contact in railways: modelling, simulation and damage prediction*. K. Dang Van and M.H. Maitournam. Ecole Polytechnique. Cedex, France. 2003.
10. *Ratcheting and fatigue-led wear in rail-wheel contact*. F.J. Franklin, T. Chung and A. Kapoor. Sheffield University. UK. 2003.
11. *Predictions of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue*. J.W. Ringsbergs, M. Loo-Morrey and A. Kapoor. Chalmers University. 1999.
12. *Simulation Of Wheel – Rail Wear By Non – Hertz Rolling Contact*. Delf University Of Techology. Faculty Of Information And System. Departament Of Technical Mathematics And Informatics.
13. *Prevention of RCF damage in curved track thought development of the INFRA-STAR two material rail*. F.J. Franklin, J.C.O. Nielsen and other. Sheffield University. 2003.
14. *Vehicle dynamics and the wheel-rail interface*. J. Evans and S. Iwnicki. ImechE. London. 2002.
15. *Residual stress and its consequences on both sides of the wheel-rail interface*. O. Orringer, Paxton, Gray and Raj. 1995.
16. *Controlled crack propagation in alumina ceramic grinding wheel*. A. Aliche and E. Le Bourhis. Ecole centrale Paris. 1999.
17. *Cracks around railway wheel flats exposed to rolling contact loads and residual stress*. M. Wallentin, H.L. Bjarnehed and R. Lundén. Chalmers University. 2004.
18. *Fractura de materiales*. M.J. Anglada. UPC. 2002.
19. *Vibraciones mecánicas en ingeniería*. F. Lafita Sabio. INTA. 1964.
20. *Vibraciones aleatorias y análisis esprectral*. D.E. Newland. AC. 1983.





## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

21. Norma UNE-EN 13262. *Aplicaciones ferroviarias. Ejes montado, bogies y ruedas*. AENOR. 2005.
22. Norma DIN 50 602. *Microscopic examination of special steels using standard diagrams to assess the content of non-metallix inclusions*.
23. Norma UNE-EN 13979-1. *Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados, bogies y ruedas monobloque. Procedimiento de aprobación técnica. Parte 1: Ruedas forjadas y laminadas*.
24. Norma ASTM E399. *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*.
25. Norma ASTM E992. *Determination of a fracture toughness of steels using equivalent energy methodology*.
26. Documentación de la asignatura Ferrocarriles. 5º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid.
27. Documentación de la asignatura Tecnología de Máquinas. 4º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid.
28. Documentación de la asignatura Fractura y Fatiga de Componentes Mecánicos. 4º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid.
29. Documentación de la asignatura Comportamiento en Servicio. 4º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid.
30. Documentación de las asignaturas Materiales I y II. 2º Ingeniería Industrial Universidad Carlos III de Madrid.
31. Documentación de NTMK, empresa situada en Rusia productora de una amplia gama de productos ferroviarios.
32. Documentación de CAF, Constructor y Auxiliar de Ferrocarriles.
33. Documentación de Bombardier, fabricante de vehículos ferroviarios.
34. Documentación de Lucchini Sidermeccanica, empresa líder mundial en diseño y producción de ejes montados para alta velocidad.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

35. Documentación de Ellwood Quality Steels Co., empresa productora de aceros de alta calidad.



### LISTA DE FIGURAS

#### CAPÍTULO 1.

Figura 1. Desprendimiento en llanta por RCF.

#### CAPÍTULO 2.

Figura 1. Rotura de depósito de gas natural licuado. Cleveland, 1944. 128 muertos.

Figura 2. Rotura del fuselaje de un avión Comet (1954), por la propagación de una fisura desde la esquina de una ventana.

Figura 3. Rotura del fuselaje de un avión Boeing 737 (1988), por la propagación de fisuras por oxidación en zonas remachadas.

Figura 4. Campo de tensiones en un defecto.

Figura 5. Factor de concentración de tensiones.

Figura 6. Zona plástica en los bordes del defecto.

Figura 7. Fractura dúctil vs Fractura Frágil.

Figura 8. Fractura Dúctil. Coalescencia de microcavidades.

Figura 9. Criterio convencional de diseño.

Figura 10. Criterios no convencionales de diseño.

Figura 11. Modo I: Apertura.

Figura 12. Modo II: Deslizamiento.

Figura 13. Modo III: Desgarro.

Figura 14. Etapas de propagación de fisuras.

Figura 15. Etapas de fatiga.

Figura 16. Carga de amplitud constante.

Figura 17. Carga de amplitud variable.

Figura 18. Tipos de cargas.

Figura 19. Curva S-N.

Figura 20. Curva S-N con límite de fatiga.

Figura 21. Curva Tensión Vs Tensión media.

Figura 22. Comparación de las teorías correctoras.

Figura 23. Radios de curvatura de la rueda y del carril.

Figura 24. Elipse de adhesión y deslizamiento según Johnson & Vermeulen.

Figura 25. Iniciación de una grieta superficial y superficie final dañada.

Figura 26. Mapa Shakedown.

Figura 27. Fallo por fatiga subsuperficial.

Figura 28. Esquema de la tensión hidrostática y de la tensión a cizalladura.

Figura 29. Rango de variación de los valores de tensión.

Figura 30. Influencia de la carga lateral sobre las tensiones subsuperficiales para el acero.



Figura 31. Morfología de un fallo por fatiga debido a defectos profundos.

### CAPÍTULO 3.

Figura 1. Principales tipos de diseños de eje montado: (a) con rodamientos externos e internos; (b) con discos de freno en el eje y en la rueda; (c) con posición asimétrica y simétrica de engranajes (1, eje; 2, rueda; 3, rodamiento; 4, disco de freno; 5, engranaje de dientes).

Figura 2. Principales elementos del perfil de la rueda.

Figura 3 Perfiles comunes de ruedas: (a) para coches de pasajeros y mercancías (Rusia); (b) para coches de alta velocidad (Rusia); (c) para material rodante industrial (Rusia); (d) para coches de pasajeros y mercancías en Europa; (e,f) para trenes de alta velocidad (Japón).

Figura 4 Desgaste de la banda de rodadura y pestaña.

Figura 5 Posibles situaciones de contacto entre la rueda y el carril: (a) contacto en un único punto; (b) contacto en dos puntos; (c) contacto toda la superficie.

Figura 6. Caja de grasa con rodamientos planos.

Figura 7. Construcciones de rodamientos de rodillos.

Figura 8. Uso de rodamientos de bolas: (a) rodamientos triples de trenes de alta velocidad en Japón; (b) rodamientos triples de trenes de alta velocidad en Francia.

Figura 9 Principales tipos de ruedas ferroviarias.

Figura 10. Partes de la rueda enteriza.

Figura 11. Disposición general de la línea con componentes (NTMK, Rusia).

Figura 12. Modelo de línea de producción con componentes (NTMK, Rusia).

Figura 13. Operación de preforma en blanco (ROLLTECH Wheels).

Figura 14. Final de la operación de prensado (ROLLTECH Wheels).

Figura 15. Preforma acabada en la prensa de preforma de 90 MN.

Figura 16. Carga de la rueda en blanco en la máquina de perfilado DRAW 1450.

Figura 17. Rodillos que conforman el perfil de rueda requerido.

Figura 18. Diseño de los rodillos del velo, observando el material antes y después del proceso de conformado.

Figura 19. Operación de conformado en la máquina DRAW 1450.

Figura 20. Rueda antes y después de entrar en la prensa de deformación de 50 MN.

Figura 21. Diseño de herramientas de forma (inicio de operación).

Figura 22. Diseño de herramientas de forma (fin de operación).

Figura 23: Máquina automática de medida láser en 3-D.

Figura 24: Carga de las ruedas acabadas en una línea de transporte.

### CAPÍTULO 4.

Figura 1. Principales tipos de diseños de eje montado: (a) con rodamientos externos e internos; (b) con discos de freno en el eje y en la rueda; (c) con posición asimétrica



## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

y simétrica de engranajes (1, eje; 2, rueda; 3, rodamiento; 4, disco de freno; 5, engranaje de dientes).

Figura 2. Principales elementos del perfil de la rueda.

Figura 3 Perfiles comunes de ruedas: (a) para coches de pasajeros y mercancías (Rusia); (b) para coches de alta velocidad (Rusia); (c) para material rodante industrial (Rusia); (d) para coches de pasajeros y mercancías en Europa; (e,f) para trenes de alta velocidad (Japón).

Figura 4 Desgaste de la banda de rodadura y pestaña.

Figura 5 Posibles situaciones de contacto entre la rueda y el carril: (a) contacto en un único punto; (b) contacto en dos puntos; (c) contacto toda la superficie.

Figura 6. Caja de grasa con rodamientos planos.

Figura 7. Construcciones de rodamientos de rodillos.

Figura 8. Uso de rodamientos de bolas: (a) rodamientos triples de trenes de alta velocidad en Japón; (b) rodamientos triples de trenes de alta velocidad en Francia.

Figura 9 Principales tipos de ruedas ferroviarias.

Figura 10. Partes de la rueda enteriza.

Figura 11. Disposición general de la línea con componentes (NTMK, Rusia).

Figura 12. Modelo de línea de producción con componentes (NTMK, Rusia).

Figura 13. Operación de preforma en blanco (ROLLTECH Wheels).

Figura 14. Final de la operación de prensado (ROLLTECH Wheels).

Figura 15. Preforma acabada en la prensa de preforma de 90 MN.

Figura 16. Carga de la rueda en blanco en la máquina de perfilado DRAW 1450.

Figura 17. Rodillos que conforman el perfil de rueda requerido.

Figura 18. Diseño de los rodillos del velo, observando el material antes y después del proceso de conformado.

Figura 19. Operación de conformado en la máquina DRAW 1450.

Figura 20. Rueda antes y después de entrar en la prensa de deformación de 50 MN.

Figura 21. Diseño de herramientas de forma (inicio de operación).

Figura 22. Diseño de herramientas de forma (fin de operación).

Figura 23: Máquina automática de medida láser en 3-D.

Figura 24: Carga de las ruedas acabadas en una línea de transporte.

## CAPÍTULO 5.

Figura 1: Rueda fracturada por el descarrilamiento de Stein-Säckingen (izquierda). Superficie final de fractura (derecha) con el inicio de la fisura crítica (círculo).

Figura 2: Intensidad de tensión en función de la longitud de fisura para diferentes tensiones usando la ecuación indicada.

Figura 3: Probeta CT y orientación dentro de la llanta de la rueda.

Figura 4 (izquierda): Curva de carga frente a desplazamiento para un ensayo válido de  $K_{IC}$  acorde con la norma.



## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 5 (derecha): Curva de carga frente a desplazamiento con un incremento adicional en el desplazamiento y con deformación plástica. Después de pasar  $P_{\max}$  ocurre la fractura frágil. La tenacidad de fractura  $K_Q$  es calculada usando  $P_Q$ .

Figura 6 (izquierda): Curva carga-desplazamiento para una muestra que no rompió durante el ensayo. La tenacidad de fractura  $K_{\max}$  en este caso es calculada con  $P_{\max}$ .

Figura 7 (derecha): Probeta CT fracturada al ser sometida a los ensayos descritos en las figuras 4-6.

Figura 8: Criterio LEFM, aplicado en casos de pequeñas zonas plásticas en extremo de fisura.

Figura 9: Criterio PYFM, aplicado en casos de una gran zona plástica en el extremo de la fisura.

Figura 10: Curva de carga-desplazamiento para el ensayo de  $K_{EE}$  acorde a ASTM E992.

Figura 11: Curva carga-desplazamiento para un ensayo de  $K_Q$  acorde a ASTM E399.

Figura 12: Diagrama de carga-desplazamiento de dos materiales para ruedas enterizas con diferentes valores de los parámetros  $K_{EE}$  y  $K_Q$ .

Figura 13: Diagrama de carga-desplazamiento de dos materiales de ruedas enterizas con el mismo valor de  $K_Q$  y diferentes valores de  $K_{EE}$ .

Figura 14: Tenacidad fractura  $K_Q$  representada frente al límite elástico  $R_p$  de todos los ensayos llevados a cabo por el Instituto de Metalurgia, ETH de Zurich.

Figura 15: Tenacidad de fractura  $K_Q$  representado frente al límite elástico  $R_p$  de aceros R7. En la esquina superior derecha algunos límites del límite elástico y de tenacidad son indicados.

Figura 16: Combinación de resistencia y tenacidad de varios aceros. El área sombreada indica acero R7.

Figura 17: Vista cerrada en el área de aceros R7.

Figura 18: Dispositivo CNC robotizado para mecanización de muestras CT.

Figura 19. Tres máquinas de 100 kN para ensayo de tensión.

Figura 20: Máquinas de tensión dinámica e hidráulica MTS de 500 kN y de tenacidad de fractura.

Figura 21: a) Diagrama usado para obtener la proporción de inclusiones no metálicas:  $K(n)$  método DIN50 602.

b) La elección del número de proporción más bajo  $n$  depende principalmente del proceso de fabricación del acero.

Figura 22: Superficie de una fractura conteniendo inclusiones de MnS. Acero calidad R7.

Figura 23: Inclusiones de MnS después de un tratamiento con Ca. Acero calidad R7.

Figura 24: Perlita gruesa, 253 HV.

Figura 25: Perlita fina, 285 HV.



## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 26: Microestructura homogénea ferrita-perlita de acero R7 con un tamaño de grano fino.

Figura 27: Microestructura de acero R7 con cementita

Figura 28: Desgaste de perlita y bainita.

Figura 29. Tenacidad de fractura circunferencial de un acero calidad R7T.

Figura 30 a) – b): Valores de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en acero clase R7T producido en tres periodos diferentes y representativos.

Figura 31 a) – b): Valores de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  frente a YS en acero clase R7T producidos en 1996 y 2006.

Figura 32: Valores de tenacidad de fractura  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en diferentes posiciones angulares de la misma rueda: a) acero R7T producido en 1986; b) acero R7T producido en 1996; c) acero R7T producido en 2006; d) posiciones angulares de la muestra CT 30 en la rueda: para cada posición angular, tres muestras han sido tomadas y el valor medio de las tres muestras es el que se representa.

Figura 33 a) – b): Valores de tenacidad de fractura  $K_Q$  y  $K_{EE}$  en diferentes posiciones angulares para una misma rueda.

Figura 34: Medida del grado de pureza en diferentes periodos de producción. Clasificación de todas las inclusiones no metálicas desde un tamaño específico (n) ascendente con Method K DIN 50602, ruedas de R7T producidas en 1986, 1996 y 2006.

Figura 35 a) – b): Contenido de residuos a) (S, P, Mo, Al, Ti) y b) gases ( $N_2$ ,  $O_2$  y  $H_2$ ) en clase de acero R7T en diferentes periodos de producción 1986, 1996 y 2006

Figura 36 a) – b): Valores medios de  $K_Q$  y  $K_{EE}$  representados frente a los valores medios de microlimpieza  $K(0)$  DIN 50 602 de tres periodos diferentes 1986, 1996 y 2006.

Figura 37: Ejemplo de relación entre tenacidad de fractura con los parámetros del proceso y microestructurales. Niveles altos de tenacidad de fractura son normalmente asociados con micro inclusiones y microestructura del tipo mostrado en el lado izquierdo. Niveles bajos de tenacidad de fractura corresponden a micro inclusiones y microestructura mostrada en el lado derecho.

Figura 38: Localización de la producción de Lucchini Sidermeccanica del año 1996 (azul) y 2006 (rojo) en el área de acero R7.

## CAPÍTULO 6.

Figura 1. Horno eléctrico (EAF).

Figura 2. Horno cuchara (LF).

Figura 3. Desgasificador al Vacío (VD).

Figura 4. Dispositivo para la toma de muestras.

Figura 5. Cambios en los contenidos de inclusiones durante el tratamiento de la cuchara.





## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

- Figura 6. Inclusiones de alúmina pura.
- Figura 7. Inclusión de alúmina y calcio en la muestra de acero.
- Figura 8. Cambios en los contenidos de inclusiones de óxidos durante la aplicación de gas Argón.
- Figura 9. Proceso esquemático de llenado de lingotes desde el fondo.
- Figura 10. Localización esquemática de las muestras tomadas en lingotes redondos.
- Figura 11. Inclusiones ( $>20\ \mu\text{m}$ ) observadas a 280 mm del fondo del lingote.
- Figura 12. Inclusiones ( $>20\ \mu\text{m}$ ) observadas en la mitad de la altura del lingote.
- Figura 13. Inclusiones ( $>20\ \mu\text{m}$ ) para muestras de lingotes (A: sigue la misma dirección del conducto de salida de la trompeta, B y C: hacia la trompeta).
- Figura 14. Distribución de tamaños de las inclusiones en 2D.
- Figura 15. Distribución del tamaño de las inclusiones en 3D.
- Figura 16. Morfología de racimos de alúmina pura.
- Figura 17. Morfología inclusiones de alúmina pura.
- Figura 18. Racimos de alúmina con inclusiones nocivas.
- Figura 19. Inclusiones de  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ .
- Figura 20. Inclusiones nocivas precedentes de la boquilla de la cuchara.
- Figura 21. Inclusiones procedentes del molde y de los ladrillos del conducto.
- Figura 22. Inclusión con base de sílice.
- Figura 23. Cavidades y agujeros encontrados en muestras de acero.
- Figura 24. Inclusiones de sulfuros.
- Figura 25. Composición de inclusiones observadas en las muestras.

## LISTA DE TABLAS

### CAPÍTULO 2.

Tabla 1. Valores de m y n en función de  $\theta$

### CAPÍTULO 3.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de las ruedas según la calidad de la misma (ficha UIC 812-3, 1984).

### CAPÍTULO 4.

Tabla 1. Tamaños de grieta crítico con una tensión aplicada de 378.95 MPa.

Tabla 2. Número de ruedas retiradas de servicio según la AAR (Association of American Railroads) entre los años 1985 y 1996 clasificadas según el motivo de retirada.

### CAPÍTULO 6.



## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Tabla 1. Composición química de las calidades de acero estudiadas en porcentaje.

Tabla 2. Regímenes de burbujeo con gas Argón.

Tabla 3. Composición de paredes y forros usados para cuchara, trompeta, conductos y molde del lingote.

Tabla 4. Comparación de las imágenes en 2D del microscopio y en 3D por SEM de inclusiones típicas.

Tabla 5. Defectos de inclusiones formadas sobre burbujas.

Tabla 6. Fuentes de inclusiones mayores de 20  $\mu\text{m}$  en lingotes.